

Ana Filipa Pedro Freitas de Faria

2º Ciclo de Estudos em

Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território

Avaliação da Suscetibilidade a Movimentos de Vertente por Método Matemático de Base Física e de Base Estatística: Estudo Comparativo no Vale do Douro Vinhateiro

2014

Orientador: Professor Doutor Carlos Valdir de Meneses Bateira

Classificação: Ciclo de estudos:

Dissertação:

AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de agradecer às pessoas que de uma forma ou outra contribuíram para o sucesso e conclusão desta dissertação.

Em primeiro lugar queria agradecer meu ao orientador, Professor Doutor Carlos Bateira, pela orientação, críticas, disponibilidade e palavras de incentivo ao longo deste ano letivo. Agradeço os conhecimentos e ensinamentos partilhados, o incentivo do trabalho em equipa e a dedicação no desenvolvimento do trabalho.

Como não poderia deixar de ser, à Professora Doutora Laura Soares, pela ajuda, acompanhamento e principalmente pelo carinho e conversas de encorajamento sem dúvida necessárias para a conclusão do meu estudo.

Obrigada aos meus orientadores que demonstraram um trabalho exemplar e em equipa. Agradeço ainda a possibilidade de integrar o projeto MODRIS, que sem dúvida proporcionou um enriquecimento profissional e pessoal. Agradeço ainda a possibilidade de realização de trabalho de campo com todas as condições que nos foram proporcionadas.

Agradeço ainda ao Professor Doutor António Alberto Gomes pela preocupação e acompanhamento ao longo do ano, incentivo, fornecimento de bibliografia e críticas construtivas. Ao Professor António Costa pela ajuda em momentos críticos, nomeadamente com problemas de *software* e pela prontidão em ajudar sempre que necessário. Ao professor Doutor José Teixeira, pela disponibilidade prestada ao longo do ano letivo. Um agradecimento a todos os professores pela partilha de conhecimento ao longo do meu percurso académico.

Às colegas e amigas de trabalho Ana Oliveira e Joana Fernandes, pelo trabalho em equipa extraordinário. Obrigada pela interajuda, partilha de conhecimentos e principalmente pela amizade que sem dúvida se mostrou essencial ao longo deste ano.

À equipa de trabalho do laboratório de Geografia Física (Manuel Teixeira e Carlos Hermenegildo) pela ajuda no levantamento e tratamento dos dados de campo, disponibilidade de informação e conversas de incentivo.

Ao Diogo Rodrigues e António Leitão pela ajuda sem dúvida essencial no trabalho de campo realizado.

Ao Engenheiro Manso e Engenheiro Márcio Nóbrega pelo acolhimento e prontidão aquando do trabalho de campo realizado. Ao Engenheiro Álvaro pela disponibilidade e partilha de conhecimentos.

Não menos importante, à minha família. Os meus pais e irmãos foram e são um pilar no sucesso da minha vida universitária e como investigadora. Agradeço e a eles dedico a minha

dissertação. Agradeço de forma particular ao meu irmão, pela ajuda na fase final com a formatação e correção.

Um agradecimento especial ao Sérgio Magalhães pela troca de conhecimentos, apoio incondicional, paciência, companheirismo e toda a ajuda.

Agradeço a todos os meus amigos pela compreensão e apoio, amizade e paciência ao longo deste ano letivo.

Um muito obrigado a todos!

RESUMO

À parte de toda a discussão científica relativamente ao conceito de risco, este estudo pretende aplicar diferentes modelos preditivos na avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente na Quinta das Carvalhas (concelho de São João da Pesqueira, Viseu).

Com a finalidade de promover a sua comparação, aplicaram-se os modelos SHALSTAB - como método matemático de base física – e o Valor Informativo – como método estatístico -, tendo sido considerados vários cenários de suscetibilidade e a sua respetiva validação.

A modelação foi executada tendo em conta dois MDE's que se distinguem pela metodologia de desenvolvimento: o MDE (A) com resolução espacial de 5m, realizado a partir de fotografias aéreas com 50cm de resolução; e o MDE (B) com a mesma resolução espacial, mas elaborado a partir de curvas de nível de 10m de equidistância. Procedeu-se ainda à realização de um inventário dos movimentos que tiveram lugar na área em estudo, imprescindível à aplicação do Valor Informativo e à validação de ambos os modelos.

Paralelamente foram levantados dados no terreno de condutividade hidráulica, capacidade de infiltração, resistividade elétrica e textura dos solos, que permitiram uma detalhada caracterização do meio físico.

A modelação com diferentes MDE's e métodos de análise (estatístico e matemático) permitiram uma análise individual tendo em conta os cenários desenvolvidos e uma avaliação conjunta na determinação da melhor metodologia de análise.

Os resultados obtidos são satisfatórios, na medida em que os valores da validação, nomeadamente a razão entre a taxa de verdadeiros positivos e falsos positivos é superior a 1 ($TPR/FPR > 1$). Ainda assim, comparando os resultados dos grupos de validação, o Valor Informativo classificado a partir das quebras da curva de sucesso apresentam melhores resultados.

Para trabalho futuro, há necessidade de melhorar o MDE (A) e reforçar/atualizar o inventário de ocorrências.

Palavras-chave: Movimentos de Vertente; Suscetibilidade; SHALSTAB; Valor Informativo; Alto Douro Vinhateiro.

ABSTRACT

Apart from all the scientific discussion regarding the concept of risk, this study intends to apply different models, in order to study the susceptibility of the occurrence of landslides in the Quinta das Carvalhas, city of São João da Pesqueira (Viseu).

In order to promote the comparison of different models, SHALSTAB - was used as the mathematical physically-based method, - and the Information Value – was used as statistical method. Different susceptibility scenarios and their validation were considered to achieve this purpose.

The modeling was performed taking into account two DEM that are distinguished by their development methodology. The DEM (A), with spatial resolution of 5m, obtained from air photographs with a resolution of 50 cm, and the DEM (B), with the same spatial resolution, conducted from contours of 10m. The elaboration of an inventory of the landslides occurred in the area facilitated the application of the Informational Value and the validation of both models.

At the same time, field data of hydraulic conductivity, infiltration capacity, resistivity profiles and soil textures were obtained that allowed a detailed characterization of the physical environment.

The modeling with different DEM's and different methods of analysis (mathematical and statistical) allowed an individual analysis taking into account the developed scenarios and a combined evaluation to determine the best method of analysis.

The results are satisfactory once the values obtained in the validation, specifically the ratio between the true positive rate and the false positive rate, is greater than 1 ($TPR/FPR > 1$). Nevertheless, when we evaluate the results of both validation groups, the Informational value classified from the breaks of the success curve show better results.

For future work, we intend to improve the DEM (A) and the occurrence of landslides inventory.

Keywords: Landslide; Susceptibility; SHALSTAB; Informational Value; Douro Valley.

SÍMBOLOS UTILIZADOS

α - Área de contribuição a montante

b - Largura da unidade de terreno

β/θ - Declive

c' - Coesão

d_w - Coluna de água acima do plano de rotura

e - Espessura do solo

g - Força da gravidade

h - Altura da coluna de água, acima do plano de rotura

i - Gradiente hidráulico

K_{fs} - Condutividade hidráulica saturada de campo

K_{fsat-0} - Condutividade hidráulica não saturada

K_{sat} - Condutividade hidráulica saturada

Φ/ϕ' - Ângulo de atrito interno

p_s - Peso específico do solo

p_w - Peso específico da água

Q/q - precipitação

σ - Tensão normal

S - Resistência ao cisalhamento

T - Transmissividade

T - Tensão cisalhante

μ - Pressão da água

γ - Peso volumétrico natural do solo

γ_{sat} - Peso volumétrico do solo saturado

γ_{sub} - Peso volumétrico do solo submerso

γ_w - Peso volumétrico da água

W - Índice de humidade

z - Espessura do solo medida em campo

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	I
ABSTRACT	IV
SÍMBOLOS UTILIZADOS.....	V
ÍNDICE GERAL	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XII
INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO 1 – ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO.....	4
1.1 Área de Estudo	4
1.2 Relevo da Região	6
1.3 Características das Formações Geológicas do Grupo do Douro	7
1.4 Usos do Solo	9
CAPÍTULO 2- ENQUADRAMENTO CONCEPTUAL	13
2.1 Em Torno do Conceito de Risco	13
2.1.1 A importância do conceito de risco em Portugal	13
2.1.2 O risco Geomorfológico	13
2.2 Movimentos de Vertente – Conceitos	15
2.2.1 Tipologia dos movimentos de vertente	18
2.3 Fatores Desencadeantes e Condicionantes dos Movimentos de Vertente	22
2.4 Hidrologia das Vertentes.....	25
2.4.1 Conceitos de escoamento- Modelo de escoamento Hortoniano	25
2.4.2 Fluxo subsuperficial.....	26
2.4.3 Fluxo interno saturado	26
2.5 (Ins) estabilidade das Vertentes.....	27
2.5.1 Teoria do Talude Infinito	29
2.6 Suscetibilidade à Ocorrência de Movimentos de Vertente	31
2.6.1 Métodos de análise	31
2.6.2 Cartografia direta, indireta, métodos qualitativos e quantitativos	31
2.7 Método Estatístico- Valor Informativo.....	34
2.7.1 Curva de sucesso e de predição	36
2.7.2 Classificação dos mapas de suscetibilidade	36
2.7.3 Método de validação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente	37

2.8 Modelos Matemáticos de Base Física	39
2.8.1 SHALSTAB	39
2.8.2 Modelo de estabilidade.....	40
2.8.3 Modelo hidrológico	40
2.8.4 Combinação do modelo de estabilidade e hidrológico.....	43
CAPÍTULO 3- MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 Metodologia	46
3.1.1 Inventário das ocorrências	47
3.2 Cartografia dos fatores condicionantes	52
3.2.1 Declives	53
3.2.2 Orientação das Vertentes.....	55
3.2.3 Áreas contributivas	57
3.2.4 Índice topográfico de humidade (TWI)	59
3.2.5 Uso do solo.....	61
3.2.6 Curvatura das vertentes	62
3.3 Parâmetros físicos	63
3.3.1 Coesão	63
3.3.3 Ângulo de atrito interno.....	64
3.3.4 Espessura do solo	65
3.3.5 Textura do solo.....	66
3.3.6 Resistividade elétrica.....	70
3.4 Parâmetros hidrológicos	78
3.4.1 Condutividade hidráulica	78
3.4.2 Capacidade de infiltração do solo	86
3.4.3 Síntese dos parâmetros de campo levantados	94
CAPÍTULO 4- MODELAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	96
4.1 Modelação DA Suscetibilidade Pelo Modelo SHALSTAB.....	96
4.1.1 Validação dos cenários	109
4.2 Modelação da suscetibilidade pelo Valor Informativo	111
4.2.1 Curva de sucesso	120
4.2.2 Validação dos cenários	121
4.3 Comparação do Modelo Matemático de Base Física e do Modelo de Base Estatística..	123
CONCLUSÃO	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Enquadramento da área de estudo.	5
Figura 2- A- Mapa geológico de Portugal, escala de 1/500000- Retirado do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P B-Zonas estruturais de Portugal Continental. Retirado de Araújo (s/d).	5
Figura 3- Unidades Geomorfológicas do Norte de Portugal.	6
Figura 4- Geologia da área de estudo.	8
Figura 5- Mapa do uso do solo da Quinta das Carvalhas.	10
Figura 6- Vinha ao alto. Retirado de SEIXAS [et al.] (2006).	10
Figura 7- Vinha em patamares. Retirado de SEIXAS [et al.] (2006).	10
Figura 8 - Vinha tradicional (pós-filoxera). Retirado de SEIXAS [et al.] (2006).	11
Figura 9- Largura dos Patamares da Quinta das Carvalhas.	12
Figura 10- Componentes do Risco. Adaptado de VERDE (2008).	15
Figura 11- Esquema representativo de desabamento, extraído de HIGHLAND and BOBROWSKY (2008).	18
Figura 12 Esquema representativo de balançamento, extraído de HIGHLAND and BOBROWSKY (2008).	18
Figura 13- Esquema representativo de um deslizamento rotacional, extraído de HIGHLAND and BOBROWSKY (2008).	19
Figura 14-Esquema representativo de um deslizamento translacional planar, extraído de HIGHLAND and BOBROWSKY (2008).	20
Figura 15- Esquema representativo de expansão lateral, extraído de HIGHLAND and BOBROWSKY (2008).	21
Figura 16-Esquema representativo de fluxos/escoadas, extraído de HIGHLAND and BOBROWSKY (2008).	21
Figura 17-Fatores condicionantes e desencadeantes dos movimentos de vertentes. Adaptado de GARCIA (2012).	22
Figura 18- Mecanismos de escoamento em tempestades. Adaptado de SELBY (1993a).	25
Figura 19- Os vários tipos de escoamento em vertentes com os caminhos de escoamento. A – fluxo superficial de horton ; B- fluxo subsuperficial; C- fluxo interno saturado. Adaptado de SELBY (1993a).	26
Figura 20- Área de origem e de expansão para canais de escoamento durante uma tempestade. Extraído de SELBY (1993a).	27

Figura 21 -Tensões/forças que atuam sob uma superfície potencial de rotura. Adaptado de SELBY (1993a).	29
Figura 22 - Diagrama que evidencia a determinação da espessura do solo por medidas verticais do bloco. Sendo que $e = z \cdot \cos \theta$. Extraído de VIEIRA (2007, p. 19).	30
Figura 23- Métodos de análise da suscetibilidade aplicados a movimentos de vertentes.	31
Figura 24- Classificação do método de validação. Adaptado de FAWCETT (2006).	38
Figura 25- Elementos topográficos do modelo hidrológico considerado no SHALSTAB. Extraído de MONTGOMERY and DIETRICH (1994).	41
Figura 26 - Classes de estabilidade do SHALSTAB. Extraído de VIEIRA (2007, p. 33).	44
Figura 27- Metodologia de trabalho.	46
Figura 28- Tipo de armação do terreno e inventário realizado.	48
Figura 29 - Exemplos de processos de instabilidade considerados para o inventário.	49
Figura 30-Ficha de campo utilizada na realização do inventário.	51
Figura 31- Declives da área de estudo- MDE (A).	53
Figura 32- Declives da área de estudo- MDE (B).	53
Figura 33- Mapa da exposição de vertentes da área de estudo- MDE (A).	55
Figura 34- Mapa da exposição de vertentes da área de estudo- MDE (B).	55
Figura 35- Áreas contributivas da área de estudo- MDE (A).	57
Figura 36- Áreas contributivas da área de estudo- MDE (B).	57
Figura 37- Índice topográfico de humidade da área de estudo- MDE (A).	59
Figura 38- Índice topográfico de humidade da área de estudo- MDE (B).	59
Figura 39- Uso o solo da área de estudo.	61
Figura 40- Curvatura das vertentes da área de estudo- MDE (A).	62
Figura 41- Curvatura das vertentes- MDE (B).	62
Figura 42- Exemplo de cicatriz de um deslizamento na Quinta das Carvalhas.	65
Figura 43- Diagrama triangular de Folk para a classificação dos sedimentos grosseiros. Extraído de DIAS (2004).	68
Figura 44- Localização das amostras de solo levantada- Quinta das Carvalhas.	68
Figura 45- Diagrama triangular da granulometria das amostras de solo recolhidas na Quinta das Carvalhas.	69
Figura 46- Configuração das matrizes bidimensional e tridimensional. Extraído de SAMOUËLIAN [et al.] (2005).	73
Figura 47- Método de Wenner. Adaptado de BESSON [et al.] (2004).	74
Figura 48- Localização dos perfis de resistividade elétrica efetuados.	75
Figura 49- Perfil de resistividade 1.	75

Figura 50- Perfil de resistividade 6.....	76
Figura 51- Perfil de resistividade 7.....	76
Figura 52- Perfil de resistividade 8.....	77
Figura 53- Perfil de resistividade 9.....	77
Figura 54- Perfil de resistividade 10.....	78
Figura 55- Permeâmetro de Guelph.....	80
Figura 56- Localização dos levantamentos efetuados da K_{fs}	82
Figura 57- Resultados do levantamento no terreno da condutividade hidráulica saturada de campo.....	82
Figura 58- Matriz de fluxo potencial. Quinta das Carvalhas.	84
Figura 59- Parâmetro Alfa - Quinta das Carvalhas.	85
Figura 60- Elementos constituintes de um solo não saturado (Fredlund e Rahardjo, 1993, in FERNANDES, 2011, p. 30).	87
Figura 61- Localização espacial dos levantamentos efetuados da capacidade de infiltração.	89
Figura 62- Taxa de infiltração dos pontos Carv1 e Carv2.....	89
Figura 63- Taxa de infiltração dos pontos Carv2, Carv3 e Carv7.....	90
Figura 64- Taxa de infiltração dos pontos Carv4 e Carv8.....	91
Figura 65-Taxa de infiltração dos pontos Carv7 e Carv8.....	92
Figura 66- Taxa de infiltração dos pontos Carv3 e Carv4.....	93
Figura 67- Taxa de infiltração dos pontos levantados.	93
Figura 68- Mapa do Cenário A de suscetibilidade- MDE (A).	97
Figura 69- Mapa do Cenário A de suscetibilidade- MDE (B).	97
Figura 70- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário A- MDE (A).	98
Figura 71- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário A- MDE (B).	98
Figura 72- Área deslizada (%) por classe de suscetibilidade no cenário A- MDE (A).	98
Figura 73- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário A- MDE (B).	99
Figura 74- Mapa do cenário B de suscetibilidade- MDE (A).....	100
Figura 75- Mapa do cenário B de suscetibilidade – MDE (B).	100
Figura 76- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário B-MDE (A).	101
Figura 77- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário B- MDE (B).	101
Figura 78- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário B- MDE (A).	101
Figura 79- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário B- MDE (B).	102

Figura 80- Mapa do cenário C de suscetibilidade – MDE (A).	103
Figura 81- Mapa do cenário C de suscetibilidade – MDE (B).	103
Figura 82- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário C- MDE (A).	104
Figura 83- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário C- MDE (B).	104
Figura 84- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário C- MDE (A).	104
Figura 85- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no C – MDE (B).	105
Figura 86- Mapa do Cenário D de suscetibilidade- MDE (A).	106
Figura 87- Mapa do cenário D de suscetibilidade- MDE (B).	106
Figura 88- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário D- MDE (A).	107
Figura 89- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário D- MDE (B).	107
Figura 90- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário D- MDE (A).	107
Figura 91- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário D- MDE (B).	108
Figura 92- Cenário 1 de suscetibilidade. Classificação a partir das quebras naturais – MDE (A).	115
Figura 93- Cenário 1 de suscetibilidade. Classificação a partir das quebras naturais – MDE (B).	115
Figura 94- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário 1- MDE (A).	116
Figura 95- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário 1- MDE (B).	116
Figura 96- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário 1- MDE (A).	116
Figura 97- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário 1- MDE (B).	117
Figura 98- Mapa do cenário 2 de suscetibilidade. Classificação através das quebras no perfil da curva de sucesso -MDE (A).	118
Figura 99- Mapa do cenário 2 de suscetibilidade. Classificação a partir das quebras no perfil da taxa de sucesso- MDE (B).	118
Figura 100- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário 2- MDE (A).	119
Figura 101- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário 2- MDE (B).	119
Figura 102- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário 2 – MDE (A).	119
Figura 103- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário 2- MDE (B).	120

Figura 104- Taxa de sucesso – MDE (A).	121
Figura 105- Taxa de sucesso – MDE (B).....	121

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Classificação simplificada de movimentos de vertentes adaptado de VARNES (1978).	16
Tabela 2- Abrangência dos termos relativos a movimentos de vertente, terreno e massa. Adaptado de (ZÊZERE, 1997b, p. 44).	17
Tabela 3- Classificação dos tipos de deslizamentos proposta por DIKAU (1996) adaptada de ZÊZERE (1997b).	19
Tabela 4- Classes de estabilidade e saturação da combinação do modelo hidrológico com o modelo de estabilidade. Adaptado de (TEIXEIRA, 2012).	45
Tabela 5- Alguns valores de referência de resistividade elétrica do solo. Adaptado de QENERGIA ().	72
Tabela 6 - Valores de referencia de K. Adaptado de Freeze e Cherry, 1979, in GOMES (2012, p. 24).	83
Tabela 7- Valores de alfa (α) tendo em conta a textura e estrutura do solo. Adaptado de (ELRICK [et al.], 1989).	86
Tabela 8- Resultados da validação do SHALSTAB- MDE (A).	109
Tabela 9- Resultados da validação do SHALSTAB- MDE (B).	110
Tabela 10- Scores do Valor Informativo- MDE (A).	113
Tabela 11- Scores do Valor Informativo- MDE (B).	114
Tabela 12- Resultado da validação obtida para os cenários 1 e 2 do MDE (A).	122
Tabela 13- Resultado da validação para os cenários 1 e 2 do MDE (B).	122
Tabela 14- Validação do Valor Informativo e do SHALSTAB para o MDE (A).	123
Tabela 15- Validação do valor informativo e do SHALSTAB para o MDE (B).	124

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Os movimentos de vertente, considerados um risco natural, são uma constante realidade e uma temática de estudo importante pelo seu impacto na sociedade. Assim sendo, o estudo, análise, gestão e mitigação do risco são uma preocupação da realidade atual.

A suscetibilidade surge como uma componente intrínseca do risco. Mas pela dimensão e complexidade de todos os conceitos que estão inerentes à noção de risco, uma análise individual mostra-se essencial. É neste sentido que surge a importância deste trabalho, no sentido da avaliação da suscetibilidade enquanto componente do risco. A avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente permite determinar a sua probabilidade de ocorrência, tendo em conta o conhecimento dos fatores condicionantes em determinada área.

A Região Demarcada do Douro (RDD) é a região vitícola mais antiga regulamentada do mundo. Nesse sentido surge a necessidade de minimizar os riscos hidrogeomorfológicos associados às práticas agrícolas recorrentes e às próprias características da área. Assim surge o projeto MODRIS: *Suscetibilidade a processos hidrogeomorfológicos no Norte de Portugal: modelação matemática de base física e de base estatística*. É um projeto desenvolvido a partir de um protocolo entre a Associação para o Desenvolvimento da Viticultura Duriense (ADVID) e a Faculdade de Letras da Universidade do Porto (FLUP). No seu contexto foram definidas duas áreas de estudo, a Quinta das Carvalhas localizada na freguesia de Ervedosa do Douro (concelho de São João da Pesqueira) e a Quinta de S. Luiz na freguesia de Adorigo (concelho Tabuaço, distrito de Viseu). Este trabalho insere-se neste projeto, tendo sido a área de estudo em causa a Quinta das Carvalhas.

A avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, um dos objetivos do MODRIS e do presente estudo, pode ser obtida recorrendo a diferentes métodos. Neste trabalho foram utilizados um método matemático de base física e um método estatístico, partindo da premissa de que a sua aplicação comparativa pode contribuir para um melhor entendimento dos processos de instabilidade geomorfológica ocorridos.

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho consiste na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente no Vale do Douro, definindo-se vários objetivos específicos, nomeadamente:

- Levantamento sobre o terreno de parâmetros hidrológicos e físicos, relacionando-os com a hidrologia das vertentes e os processos de instabilidade;
- Modelação da suscetibilidade através da aplicação do método matemático de base física (SHALSTAB) e base estatística (Valor Informativo) em patamares agrícolas;

- Realização de cenários de suscetibilidade para o SHALSTAB, tendo em conta os parâmetros físicos levantados no terreno e através de retroanálise;
- Realização de cenários de suscetibilidade para o Valor Informativo, baseados na metodologia de classificação;
- Análise individual e comparativas dos diferentes cenários;
- Validação dos cenários do SHALSTAB e do Valor Informativo.

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é constituída por quatro capítulos. O primeiro remete para o enquadramento da área de estudo, nomeadamente a caracterização geológica e geomorfológica da Quinta das Carvalhas e o seu enquadramento regional, de modo a compreendermos os aspetos morfoestruturais no seu conjunto.

O segundo capítulo tem por objetivo a compreensão dos conceitos inerentes ao objetivo desta dissertação. Numa primeira fase, será efetuada uma abordagem ao conceito de risco geomorfológico e como é analisado em Portugal. Seguidamente será abordado o risco natural inserido no contexto do trabalho, nomeadamente os movimentos de vertente. Será feita uma análise da evolução dos conceitos e das várias tipologias dos movimentos de vertente, assim como dos seus fatores desencadeantes. Acresce ainda uma análise do funcionamento hidrológico de vertentes e a teoria do talude infinito.

Este capítulo integra igualmente um breve enquadramento dos vários métodos de análise que podem ser utilizados para avaliar a suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente, assim como dos métodos de validação.

O capítulo 3 remete para os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho. Envolve uma descrição do inventário de ocorrências, da elaboração da cartografia dos fatores condicionantes a partir dos MDE's (A) e (B) e dos ensaios sobre o terreno efetuados.

Por fim, o quarto capítulo faz referência à modelação, análise e discussão dos resultados. Na modelação matemática, serão aplicados vários cenários tendo em conta os parâmetros mecânicos/físicos de campo, procedendo-se à sua validação a fim de determinar o que apresenta uma melhor capacidade preditiva. O mesmo procedimento será feito para a modelação estatística, aplicando vários cenários tendo em conta o método de classificação da suscetibilidade final e recorrendo à sua validação.

Por fim serão analisados e comparados os resultados da modelação matemática e estatística.

CAPÍTULO 1 – ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

1.1 ÁREA DE ESTUDO

A Quinta das Carvalhas (figura 1), com 3km² de área, localiza-se na margem sul do Rio Douro, na freguesia de Ervedosa do Douro (concelho de São João da Pesqueira, Viseu), integrando, juntamente com outros 20 concelhos a Região Demarcada do Douro (RDD).

Do ponto de vista morfoestrutural enquadra-se no Maciço Antigo (figura 2A), na Zona Centro Ibérica, que é constituída por um ‘complexo de xistos e grauvaques’ (tipo *flysh*), com a presença de alinhamentos quartzíticos associados a dobras de direção NW-SE a W-E. Este complexo, atualmente designado por Super-Grupo Dúrico-Beirão, é recortado por rochas graníticas cuja instalação foi condicionada por diferentes fases da tectogénese hercínica (FERREIRA [et al.], 1987). Os granitóides variam entre granitos de duas micas, granitos monzoníticos e granodioritos biotíticos, evidenciando um comportamento distinto face à alteração, não só pela sua petrografia mas também pela textura e densidade de fracturação (FERREIRA [et al.], 2004).

Os materiais metassedimentares, designadamente os xistos, apresentam-se como rochas impermeáveis que permitem o desenvolvimento de uma rede de drenagem densa e hierarquizada. Assim, na RDD são raras as superfícies de aplanamento bem conservadas, assim como as escarpas de falha tendem a degradar-se (Ribeiro, 1940, 1955, in FERREIRA, [et al.], 2004).

Os entalhes fluviais ilustram a influência da tectónica, assumindo um carácter retilíneo particularmente notório em áreas de substrato granítico, evidenciando geralmente maior sinuosidade e ramificação nas áreas de xisto.

Devido à sua posição a oriente do alinhamento montanhoso Alvão-Marão e Montemuro, a RDD insere-se já no contexto dos climas mediterrâneos de influência continental, no subtipo climático ‘acentuado pela posição topográfica’ (DAVEAU, 1988).

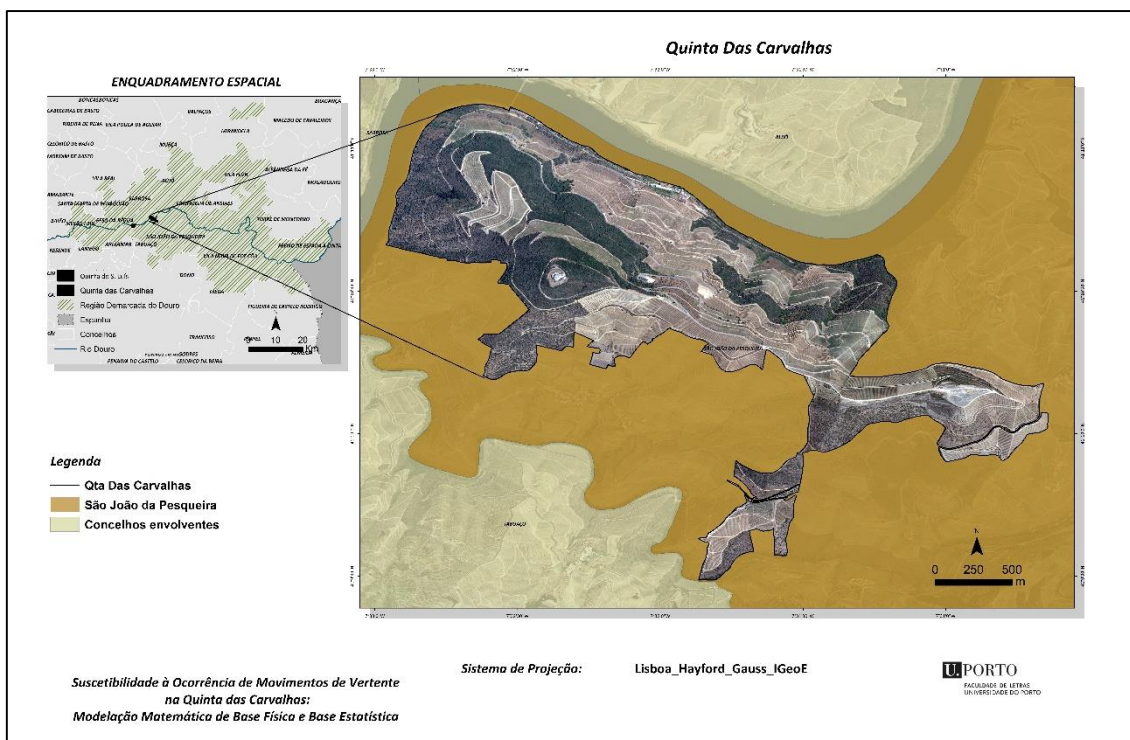


Figura 1- Enquadramento da área de estudo.

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

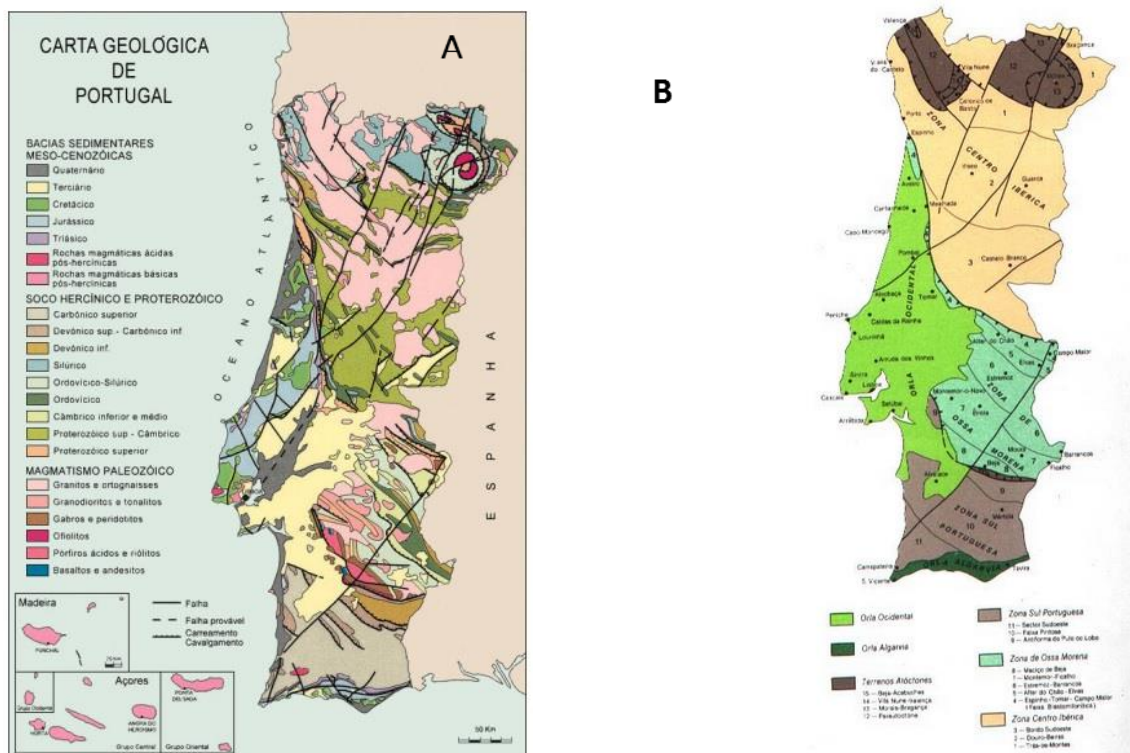


Figura 2- A- Mapa geológico de Portugal, escala de 1/500000- Retirado do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P B-Zonas estruturais de Portugal Continental. Retirado de Araújo (s/d).

1.2 RELEVO DA REGIÃO

As principais unidades de relevo a salientar para o conhecimento da área de estudo (figura 3), são a superfície da Meseta, os Planaltos Centrais e as Montanhas Ocidentais (FERREIRA, 1991)

A superfície da Meseta é uma superfície de aplanamento bem conservada, de onde por vezes despontam relevos residuais de dureza.

De acordo com FERREIRA [et al.] (2004) integra a designada *superfície*

culminante (Cretácico Superior ao Miocénico Superior), uma superfície poligénica desenvolvida em concordância com a Bacia do Douro, gerada em regime ainda endorreico. Apresenta-se deformada no bordo Norte Cantábrico e no bordo Oeste Atlântico, elevando-se e dessa forma fossilizando os depósitos interiores da Bacia do Douro. No Plio-Quaternário, aquando do levantamento da Meseta Norte, dá-se a captura pelo Douro inferior da rede endorreica da Bacia do Douro Superior (Biro, 1949, in FERREIRA [et al.], 2004), permitindo o forte encaixe da rede hidrográfica no setor ocidental da referida meseta.

Os Planaltos Centrais, separados da Meseta por um rebordo abrupto definido pelo desligamento tardi-hercínico Bragança-Vilariça-Manteigas, traduzem-se por superfícies onduladas degradadas pelo encaixe da rede hidrográfica, apresentando diversas altitudes. Prolongam-se até às Montanhas Ocidentais, sendo o seu limite definido pelo desligamento Verín-Régua-Penacova. Estas montanhas, evidenciando vertentes extensas e abruptas que indiciam forte condicionamento tectónico, são um importante fator de diferenciação climática entre as regiões do Minho e Trás-os-Montes. Efetivamente, constituem uma barreira orográfica à circulação para o interior das massas de ar atlânticas, pelo que o clima da área situada a oriente dos maciços do Alvão-Marão e Montemuro apresenta valores de precipitação e temperatura mais baixos e elevados, respetivamente (PEDROSA [et al.], 2004).

A estas unidades poderíamos acrescentar o Vale do Douro, que atravessa todas as anteriores, assim como a Plataforma Litoral, uma (...) *faixa aplanada que se situa próximo da linha de costa, a altitudes variadas, e sobre a qual assentam um conjunto de depósitos com características diversas, geralmente considerados plio-pleistocénicos* (SOARES, 2008, p. 39).

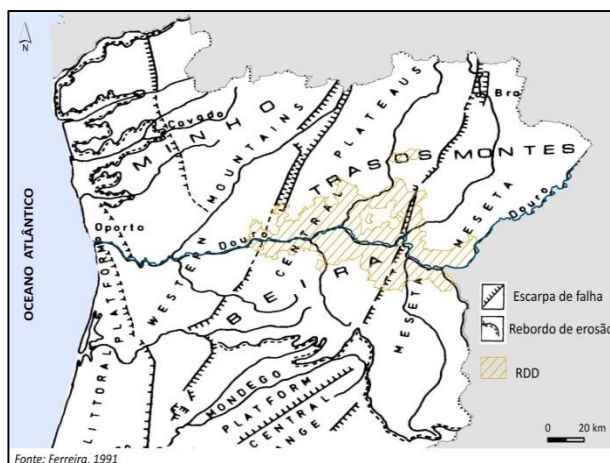


Figura 3- Unidades Geomorfológicas do Norte de Portugal.

Em Portugal, o encaixe do Rio Douro deve-se em grande medida à erosão regressiva que se processa a partir do Atlântico, responsável pela captura da drenagem endorreica que se dirigia para o interior de Castela-a-Velha. O encaixe no Norte da Beira faz-se através dos níveis inferiores dos Planaltos Centrais (principalmente em materiais do ‘complexo xisto-grauváquico’), permitindo individualizar uma drenagem pré-Douro.

O vale do Douro apresenta-se profundo e contínuo, ao longo de 210 km, desde a garganta estreita do Douro Internacional até à Foz. O rio apresenta sinuosidades acentuadas ao ‘atingir’ o graben da Vilarica, fruto do já referido desligamento Bragança-Vilarica-Manteigas, mas acaba por recuperar a jusante um traçado mais suave, se bem que meandrante, entre vertentes íngremes, retilíneas e xistosas características da RDD. Após a passagem pelo desligamento Verin-Régua -Penacova, o Douro encaixa-se nas Serras do Marão e Montemuro.

A diminuição drástica do seu encaixe é visível a jusante das cristas quartzíticas de Valongo, ao entrar na plataforma litoral. O estuário é encerrado por uma garganta granítica, com vertentes escarpadas praticamente até ao mar, onde é possível identificar terraços de origem fluvial e marinha (FERREIRA [et al.], 2004).

Em suma, o vale do Douro é caracterizado por um forte encaixe da rede hidrográfica e por vertentes escalonadas em vários patamares com diferentes altitudes. A parte superior dos vales dos seus afluentes possui formas suaves e os topos das vertentes apresentam-se aplanados (PEREIRA, 2009).

1.3 CARACTERÍSTICAS DAS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS DO GRUPO DO DOURO

O grupo do Douro do Super Grupo Dúrico-Beirão (Câmbrico) é constituído pelas seguintes Formações, das mais antigas para as mais recentes: Bateiras, Ervedosa do Douro, Rio Pinhão, Pinhão, Desejosa e, por fim, a formação de São Domingos. No entanto, como referem MOREIRA [et al.] (2010, p. 151) (...) *algumas destas formações estariam duplicadas tectonicamente, face à existência de correimentos sin-sedimentares, de idade Sarda, [o que] permitiu explicar a semelhança de fácies entre a Formação da Ervedosa e a Formação do Pinhão e entre a Formação Bateiras e a Formação de Rio Pinhão, pelo que atualmente se considera a existência de apenas quatro formações (...).* Assim, salientam-se as formações de Bateiras e Ervedosa do Douro, de carácter autóctone, e a de Desejosa e S. Domingos, alóctones (Silva e Ribeiro, 1985; Sequeira & Pereira, 2000).

Segundo RIBEIRO [et al.](1991), os materiais de que derivam foram-se depositando no Proterozóico superior-Câmbrico num fosso marinho intracontinental (Zona Centro Ibérica), que admite no entanto subdivisões, situando-se a estrutura (sub-fosso) que os ‘acolheu’ a norte do Sulco Carbonífero do Douro (PEREIRA). Da atividade tectónica que os afetou destacam-se as fases D1 e D3 variscas, de que resultam sistemas de fracturação de direção NW-SE, ENE-WSW, NE-SW, NNE-SSW (SEQUEIRA and PEREIRA, 2000). Estes sistemas vão condicionar de forma notória a rede de drenagem, que se encaixa ao longo destas áreas de fragilidade estrutural (SOUSA, 1989).

Numa leitura mais aprofundada da área de estudo, a Quinta das Carvalhas está localizada numa área onde afloram as formações de Bateiras e de Ervedosa do Douro (figura 4).

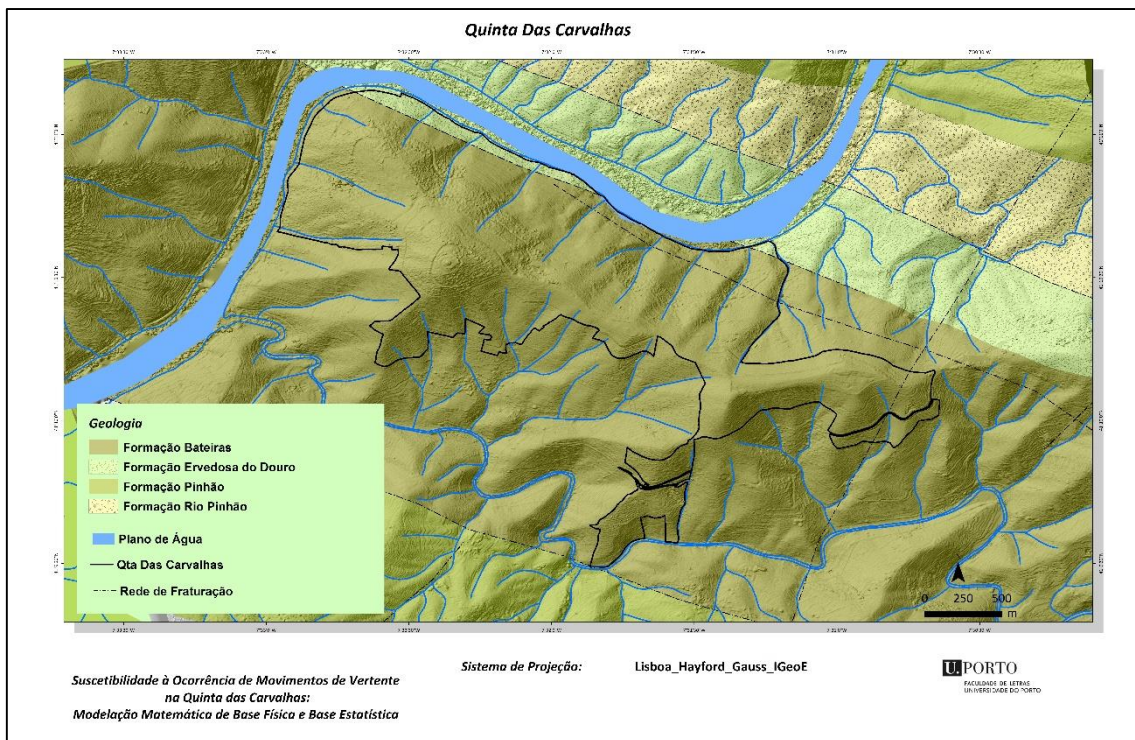


Figura 4- Geologia da área de estudo.

Fonte: Folha 10D(Alijó)- Carta Geológica de Portugal

A formação de Bateiras apresenta-se como a unidade estratigráfica mais antiga do grupo do Douro, manifestando-se no núcleo de três estruturas anticlinais da primeira fase hercínica, nomeadamente no anticlinal de Abaças-Bateiras, anticlinal de Adorigo e anticlinal de Santo Adrião-Santa Leocádia. A formação de Bateiras pode ser dividida em dois membros, sendo o inferior caracterizado pela presença de xistos negros intercalados com metagrauvaques e filitos,

enquanto o superior conta com a presença de níveis de calcários a que se sobrepõem espessos metagrauvaques com intercalações de filitos (SOUSA, 1989).

A tectónica 'presente' na Quinta das Carvalhas, remete para a fracturação varisca de orientação essencialmente WNW-ESE. Esta fracturação apresenta-se importante na área da quinta, pois marca a transição da Formação de Bateiras para a Formação de Ervedosa do Douro. A transição é feita de forma gradual através da passagem de xistos escuros laminados do topo da Formação de Bateiras para uma sucessão finamente estratificada de cor verde (SEQUEIRA and PEREIRA, 2000).

A formação de Ervedosa do Douro é assim constituída essencialmente por filitos cloríticos e quartzo-filitos verdes, cloríticos duros, correspondendo, os termos psamíticos, a metagrauvaques, metaquartzovaques e quartzitos impuros (SOUSA, 1989).

Estas formações vão-se refletir sobre as características dos solos presentes na Quinta das Carvalhas, principalmente ao nível textural, uma vez que, de acordo com MOREIRA [et al.] (2010, p. 151) a diferenciação entre as formações do grupo do Douro assenta sobretudo na (...) *variação das percentagens relativas de areias e argilas.*

1.4 Usos do Solo

Na Quinta das Carvalhas, é possível evidenciar vários tipos de uso do solo (figura 5). Do total da área da quinta, a vinha apresenta uma maior área, nomeadamente 116ha. São utilizadas várias técnicas de armação do terreno, essencialmente a vinha ao alto e a vinha em patamares com muros de pedra em seco (pós-filoxera) ou com taludes de terra. O manual de boas práticas vitícolas apresenta metodologias de implantação da vinha de acordo com a legislação em vigor (INSTITUTO DOS VINHOS DO DOURO E DO PORTO, 2012a).

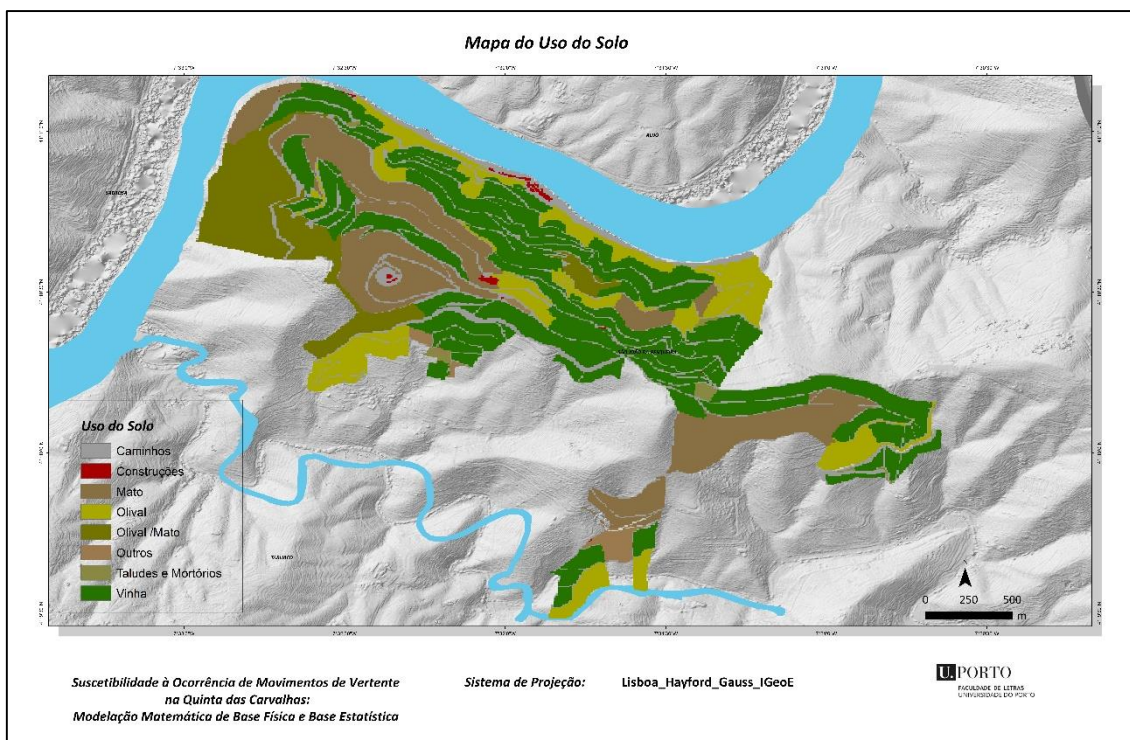


Figura 5- Mapa do uso do solo da Quinta das Carvalhas.

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

A vinha ao alto (figura 6) representa a menor expressão do total da área plantada. Este tipo de armação caracteriza-se pela disposição dos bardos de acordo com o maior declive da vertente. A sua implantação só deve ocorrer em vertentes em que o declive não exceda os 40% (ou até mesmo os 30% em determinadas regiões). Os 40% de declive são o limite em que deixa de ser possível o uso de mecanização por tração direta (INSTITUTO DOS VINHOS DO DOURO E DO PORTO, 2012a).

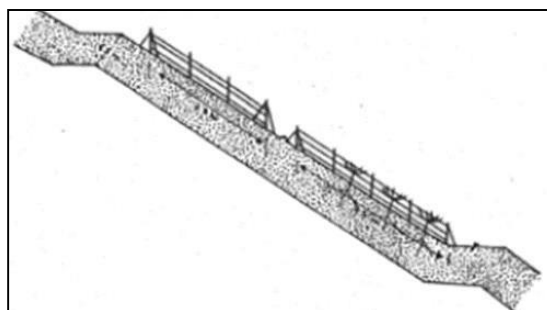


Figura 6- Vinha ao alto. Retirado de SEIXAS [et al.] (2006).

A vinha em patamares (figura 7) ocupa uma área considerável da quinta, e caracteriza-se por patamares largos (superior a 2,5m) e horizontais com taludes em terra, comportando duas ou mais fiadas de vinha (figura 9). Em patamares mais estreitos, com largura inferior a 2.5m, é

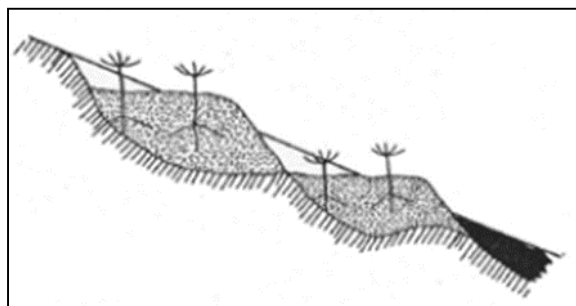


Figura 7- Vinha em patamares. Retirado de SEIXAS [et al.] (2006).

plantada apenas uma fiada de vinha na zona externa da plataforma. Em micropatamares com larguras até 1m, as videiras são plantadas no topo do talude à cota original do terreno.

De uma forma geral, este tipo de armação de terreno normalmente possui 2 ou 3 fiadas de vinha. No entanto, com declives superiores a 20%, não deve exceder as 2 fiadas de vinha (e os terraços não devem exceder os 3.8 a 4m de largura). A distância entre cada fiada de vinha¹ no patamar é de 2.2 a 2.3 m. Há que ter também atenção a distância entre a fiada exterior e o bordo do talude. Deverá permitir a circulação de pessoas e máquinas mas também tem como objetivo a diminuição do risco de exposição do sistema radicular da vinha (INSTITUTO DOS VINHOS DO DOURO E DO PORTO, 2012a). Proceda-se à criação de uma rede de estradas de traçado oblíquo à estrutura dos patamares. A largura das estradas deve cumprir uma largura de 3 a 3.50m e declives não superiores a 10/15% (INSTITUTO DOS VINHOS DO DOURO E DO PORTO, 2012a).

A armação designada de pós-filoxera (figura 8) distingue-se da vinha tradicional pré-filoxera pela largura dos socacos, tendo na mesma em comum os muros em pedra. São terraços largos com alguma inclinação relativamente ao declive da encosta separada por muros. As videiras estão dispostas segundo bardas armadas horizontalmente suportadas por pedra de xisto segundo compassos estreitos de 0.88m por 1.32m (INSTITUTO DOS VINHOS DO DOURO E DO PORTO, 2012b).

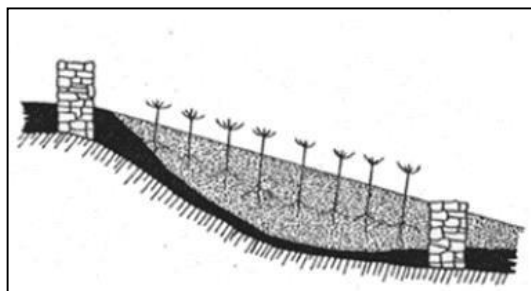


Figura 8 - Vinha tradicional (pós-filoxera). Retirado de SEIXAS [et al.] (2006).

Outra opção de armação passa pela construção de parcelas com declive próximo do natural da vertente, de igual modo separados por muros de suporte, mas de dimensão mais reduzida. As fiadas organizam-se segundo as curvas de nível, tendo cada parcela entre 10 a 13 fiadas de vinha (INSTITUTO DOS VINHOS DO DOURO E DO PORTO, 2012b). É recomendável a criação de um espaçamento de 1.50m entre o bardo inferior de cada terraço e o muro de suporte (INSTITUTO DOS VINHOS DO DOURO E DO PORTO, 2012a).

¹ No Manual de Boas práticas, utilizam o termos “bardos” sinónimo de fiadas de vinha.

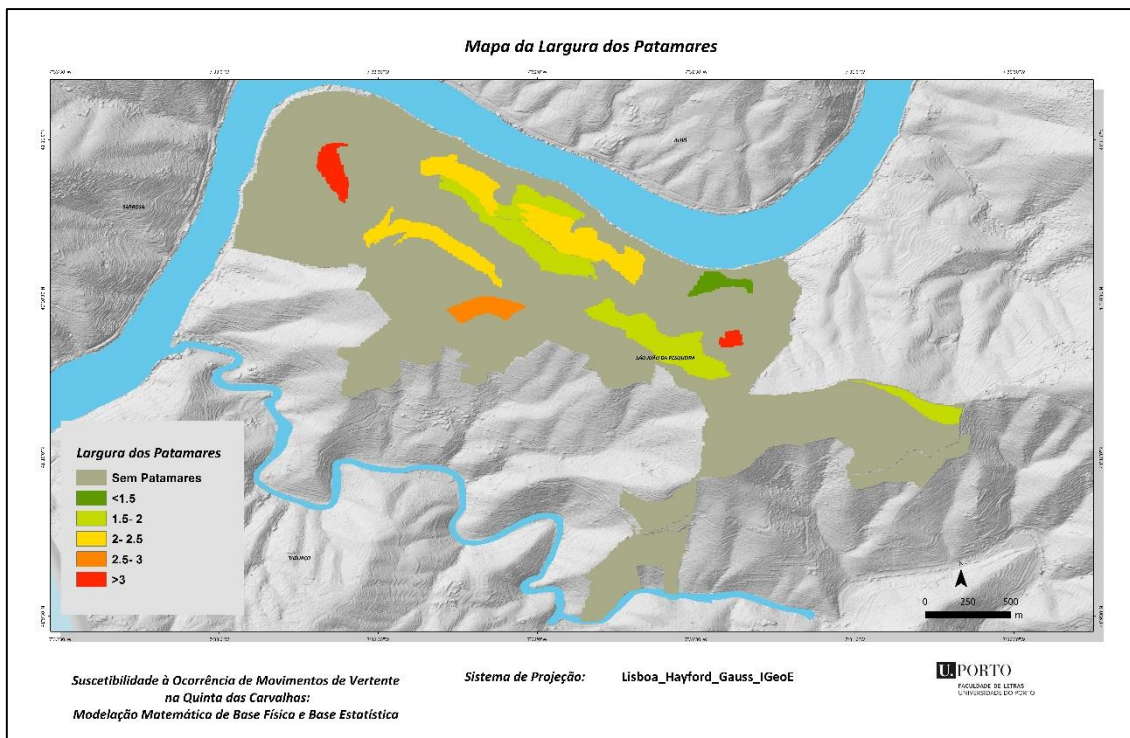


Figura 9- Largura dos Patamares da Quinta das Carvalhas.

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

CAPÍTULO 2- ENQUADRAMENTO CONCEPTUAL

2.1 EM TORNO DO CONCEITO DE RISCO

2.1.1 A importância do conceito de risco em Portugal

Os movimentos de vertente, pela sua frequência e danos implicados, têm contribuído para o desenvolvimento de cada vez mais estudos centrados em metodologias de análise, gestão e mitigação das suas causas e consequências (CARDINALI [et al.], 2002, JULIÃO [et al.], 2009, ZÊZERE, 1997b, ZÊZERE [et al.], 2010b). Constituindo um dos processos integrados no domínio dos riscos naturais, assim como as inundações ou a atividade sísmica entre outros, torna-se necessário compreender alguns conceitos básicos associados à teoria do risco.

Neste contexto, podem destacar-se vários estudos de âmbito geral e específico e aplicados a diferentes escalas de análise. A título de exemplo, à escala do município, salientamos o *Guia Metodológico para a Produção de Cartografia Municipal de Risco e para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de Base Municipal* de Julião et al. (2009), que tem como objetivo o estudo dos riscos naturais, tecnológicos e mistos no sentido de antever/prever, gerir e mitigar possíveis eventos e/ou prejuízos associados a ocorrências danosas. Este guia surge na sequência da falta de estudos a uma escala de maior detalhe, uma vez que, a nível nacional, o Programa Nacional de Políticas de Ordenamento do Território (PNPOT) - publicado em 4 de Setembro de 2007 (Lei n.º 58/2007) - expressou a necessidade de serem desenvolvidas metodologias standardizadas e pormenorizadas passíveis de resolver problemas a uma grande escala.

Com efeito, o PNPOT, enquanto instrumento de gestão, *considerou os riscos e a vulnerabilidade territoriais na definição do modelo territorial* preconizado para o país (JULIÃO [et al.], 2009, p. 13).

2.1.2 O risco Geomorfológico²

O Guia Metodológico referido, acaba por conseguir conciliar as divergências científicas dos vários conceitos associados ao 'risco', considerando-se adequado à política e problemas nacionais.

² Como neste trabalho será abordada a avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente, tentaremos adaptar a estes processos os conceitos apresentados.

Neste sentido e face às propostas que apresenta ao nível do ordenamento do território serão adotadas as suas definições, a que se associam igualmente propostas de BATEIRA (2001) e ZÊZERE (1997b), mostrando-se mais representativas à realidade em questão e cumprindo orientações já definidas por VARNES (1984b).

Também a UNESCO tentou desenvolver uma terminologia internacional, no âmbito do Programa Ciências da Terra. Neste contexto o conceito *natural hazard (H)* (perigosidade) está associado à probabilidade de ocorrência, num determinado período de tempo, numa determinada área de um fenómeno potencialmente prejudicial (VARNES, 1984b). A perigosidade geomorfológica deve conter informação relativa à probabilidade espacial e temporal das ocorrências, o seu tipo, magnitude, velocidade, deslocação horizontal e limite de retrogressão dos movimentos de vertente, preditos numa dada área (Hartelén e Viberg, 1988, in SOETERS and VAN WESTEN, 1996). No entanto tem sido apenas considerada a probabilidade temporal (Einstein, 1997, in GARCIA and ZÊZERE, 2003).

Já o termo suscetibilidade (*susceptibility*) remete para a probabilidade de ocorrência de um fenómeno danoso numa determinada área (componente espacial da probabilidade), com base nos fatores condicionantes do terreno. É independente do seu período de recorrência (GARCIA and ZÊZERE, 2003, SOETERS and VAN WESTEN, 1996).

Considera-se que vulnerabilidade (*vulnerability*) é o grau de perda de um elemento ou conjunto de elementos em risco (E), resultado da ocorrência de um fenómeno natural (movimento de vertente) com determinada magnitude, que se expressa numa escala de zero (sem dano) a 1 (perda total) (VARNES, 1984b).

A análise da vulnerabilidade leva à necessidade de compreender as relações existentes entre os fenómenos perigosos e os elementos expostos (Léone, 1996, in GARCIA and ZÊZERE, 2003).

Portanto o risco (*risk*), (figura 10) implica avaliar o número de perdas humanas, pessoas feridas, danos das propriedades e bens, rutura das atividades económicas devido a um fenómeno natural (VARNES, 1984b).

De acordo com o Guia Metodológico, o risco remete para a (...) *probabilidade de ocorrência de um processo (ou ação) perigoso e respetiva estimativa das suas consequências sobre pessoas, bens ou ambiente, expressas em danos corporais e/ou prejuízos materiais e funcionais, diretos ou indiretos*, o que reflete o produto entre perigosidade e a consequência (dano potencial) (JULIÃO [et al.], 2009, p. 22).

Deste modo, o risco pode ser estudado em 3 etapas: análise, avaliação e gestão do risco, sendo estas as fases necessárias à previsão, gestão e mitigação do risco geomorfológico.

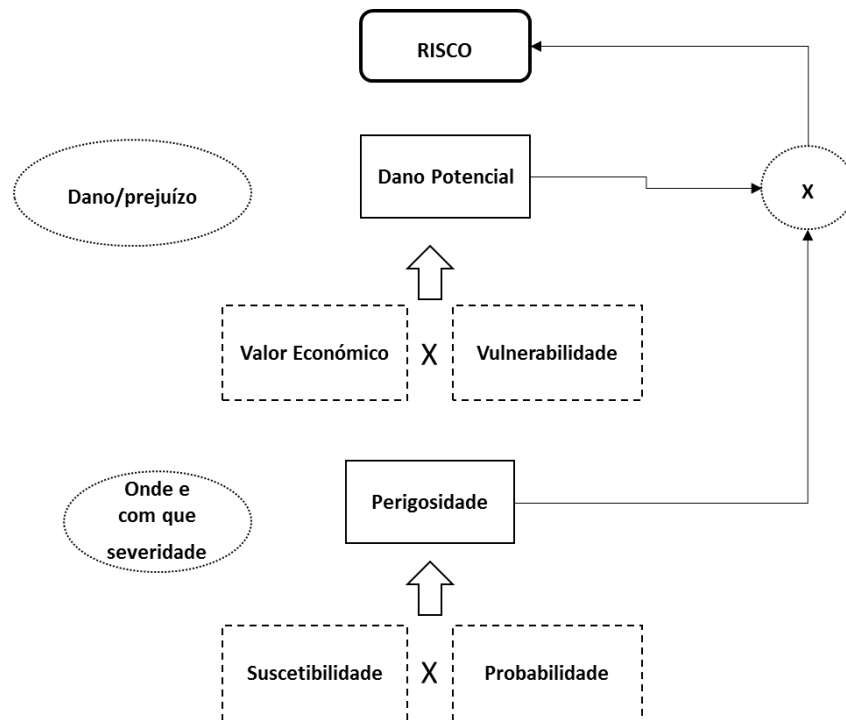


Figura 10- Componentes do Risco. Adaptado de VERDE (2008).

2.2 MOVIMENTOS DE VERTENTE – CONCEITOS

Dos autores que se destacam no estudo dos movimentos de vertente, abordando a sua caracterização e tipologia, VARNES (1978) assume-se como referência. Tem sido à volta da sua classificação que vários estudos se basearam, quer utilizando a mesma terminologia, quer adaptando-a às necessidades que se foram evidenciando.

Segundo a classificação de VARNES (1978) (tabela1), o autor faz a distinção entre o tipo de material envolvido na rutura e o tipo de movimento que a impulsionou. Os materiais considerados são rocha e solo, subdividindo este último em terra e detritos (in CRUDEN and VARNES, 1996c, p. 52). Onde:

- A rocha é considerada uma massa dura e firme, que permanece intacta até à iniciação do movimento;
- O solo é um agregado de partículas sólidas, geralmente de minerais e rochas, transportada ou formada pela desagregação/erosão das rochas. Os espaços vazios do solo são preenchidos e ocupados por líquidos ou gases;
- A terra corresponde aos materiais em que 80% ou mais das partículas são inferiores a 2mm, sendo esse o limite máximo da fração arenosa;

- Os detritos contêm uma porção significativa de material grosseiro, em que 20% a 80% das partículas são maiores do que 2mm, e o restante das partículas são menores do que 2mm.

Já o tipo de movimentos (tabela1), ainda de acordo com VARNES (1978), classificam-se em desabamentos (*falls*), balançamentos (*topples*), deslizamentos (*slides*), expansão lateral (*lateral spreads*) e fluxos (*flows*), englobando ainda o que designa por movimentos de vertente complexos (*complex landslides*), quando se conjugam dois ou mais tipos de movimentos (CRUDEN and VARNES, 1996d, p. 52).

Tabela 1- Classificação simplificada de movimentos de vertentes adaptado de VARNES (1978).

TIPO DE MOVIMENTO		TIPO DE MATERIAL	
		ROCHA	SOLO
			<div>Predominantemente grosseiro</div> <div>Predominantemente fino</div>
Desabamento (<i>Falls</i>)		Desabamento de rocha	Desabamento de detritos
Balançamento (<i>Topples</i>)		Balançamento de rocha	Balançamento de detritos
Deslizamentos (<i>Slides</i>)	Rotacional	Deslizamento de rocha	Deslizamento de detritos
	Translacional		
Expansão lateral (<i>Lateral Spreads</i>)		Expansão lateral de rocha	Expansão lateral de detritos
Fluxos (<i>Flows</i>)		Fluxo de rocha	Fluxo de detritos
Complexo (Complex)			

Na literatura científica, a terminologia sobre os movimentos de vertente sofreu adaptações após a publicação da proposta de VARNES (1958; 1978). Um dos principais termos que gerava alguma controvérsia era o de *landslide*, com vários autores a definir a sua própria classificação (Terzaghi, 1952, Cruden, 1991, Hansen, 1984, Hutchinson, 1968, in ZÊZERE, 1997c).

Logo em 1958, com as primeiras publicações acerca do assunto, Varnes considera que o termo *landslide* está associado a três tipos de movimentos, a destacar: *fall* que significa desabamento, *slide*, associado a deslizamento e *flow* (fluxo ou escoada) (in ZÊZERE, 1997c). Mais tarde, devido a discordâncias relativamente aos termos definidos, Varnes publicou uma revisão da sua classificação (em 1978), substituindo *landslide* por *slope movements* (movimentos de vertente), acrescentando ainda aos principais grupos (tabela 1) os *topples* (balançamentos) e

lateral spreads (expansões laterais). Desta classificação são excluídos o processo de subsidência e as ações do gelo e da neve (ZÊZERE, 1997a).

Devido a variações na terminologia sobre movimentos de vertentes, outras organizações científicas têm-se debruçado sobre a questão na procura de uma terminologia comum a ser utilizada internacionalmente, entre as quais se destaca a IAEG (*International Association of Engineering Geology*).

À IAEG foi solicitada a elaboração de uma nomenclatura para movimentos de vertente pelas Nações Unidas (UNESCO), a qual originou o *Working Party on the World Landslide Inventory* (WP/WLI), desenvolvido e divulgado em 1990. Este relatório baseia-se nas classificações de VARNES (1978) e CRUDEN (1991), ambos considerados a ‘base’ científica relativa aos movimentos de vertente. O estudo da nomenclatura e terminologia dos movimentos de vertente resultou em 4 relatórios (WP/WLI, 1993b, WP/WLI, 1991, WP/WLI, 1993a, WP/WLI, 1990).

De acordo com estes relatórios, o WP/WLI considera *landslide*/movimentos de vertente, um termo concreto e acessível, classificando-o como um (...) *movimento de descida, numa vertente, de uma massa de rocha, terra ou detritos* (WP/WLI, 1993b, p. ii).

Após publicação do relatório, autores como DIKAU [et al.] (1996a) adotaram os conceitos publicados pelo grupo de investigação da Unesco, considerando ser uma fonte a seguir no sentido de se poder uniformizar o conceito de movimento de vertentes e toda a sua extensão conceptual.

À parte das diferentes classificações e terminologias, neste trabalho serão adotadas principalmente as classificações de (CRUDEN and VARNES, 1996c, VARNES, 1984b, VARNES, 1958, VARNES, 1978, WP/WLI, 1993b, WP/WLI, 1991, WP/WLI, 1993a, WP/WLI, 1990), resumindo-se da seguinte forma a abrangência dos termos:

Tabela 2- Abrangência dos termos relativos a movimentos de vertente, terreno e massa. Adaptado de (ZÊZERE, 1997b, p. 44).

TERMO	ABRANGÊNCIA
Movimentos de Vertente (<i>Landslides</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Desabamento• Balançamento• Deslizamento• Expansão Lateral• Escoda/fluxo• Movimentos Complexos
Movimentos de Terreno	<ul style="list-style-type: none">• Movimentos de vertente• Subsidência (abatimentos; assentamentos)• Expansão- retração em solos argilosos
Movimentos de Massa	<ul style="list-style-type: none">• Movimentos de Terreno• Movimentos associados à neve e ao gelo

2.2.1 Tipologia dos movimentos de vertente

O **desabamento (fall)** (figura 11) implica uma deslocação de solo ou rocha a partir de um abrupto, ao longo de uma superfície onde os movimentos tangenciais são nulos ou reduzidos. O material desloca-se predominantemente pelo ar, por queda, por saltação ou rolamento (WP/WLI, 1993b). O processo é extremamente rápido, excetuando-se quando a massa é cortada na base. A queda ocorrerá por pequenos movimentos de deslizamento ou de balançamento, que vão separar o material da massa intacta (CRUDEN and VARNES, 1996b).

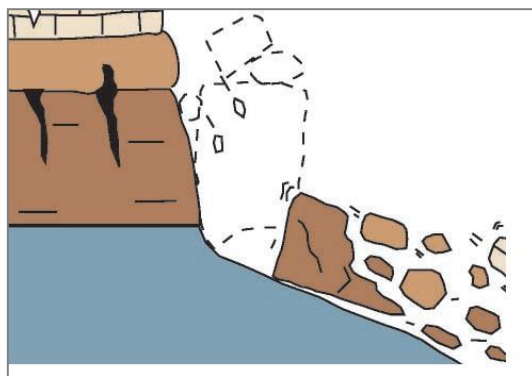


Figura 11- Esquema representativo de desabamento, extraído de HIGHLAND and BOBROWSKY (2008).

O corte na base ocorre normalmente em solos coesivos ou em rochas, em que o material afetado se desloca para além do limite jusante do plano de rutura pela erosão nas margens dos rios ou pelo trabalho de sapa do mar no litoral (CRUDEN and VARNES, 1996c).

O **balançamento (topple)** (figura 12) consiste numa *rotação de uma massa de solo ou rocha, a partir de um ponto ou eixo, situado abaixo do centro de gravidade da massa afetada* (WP/WLI, 1993b, pp. 6-2). O processo pode ocorrer devido ao impulso causado pela força da gravidade, exercida pelo aumento do declive do material, ou mesmo pela pressão provocada pela água ou neve nas fendas do material. O balançamento pode originar quedas ou mesmo deslizamentos da massa deslocada, tendo como influência/dependência a geometria da massa, a geometria da superfície de separação, a orientação e a extensão das descontinuidades ativas em movimento. O processo tanto pode ser lento como extremamente rápido, podendo evoluir para outro tipo de movimento como o desabamento ou deslizamento (CRUDEN and VARNES, 1996a).

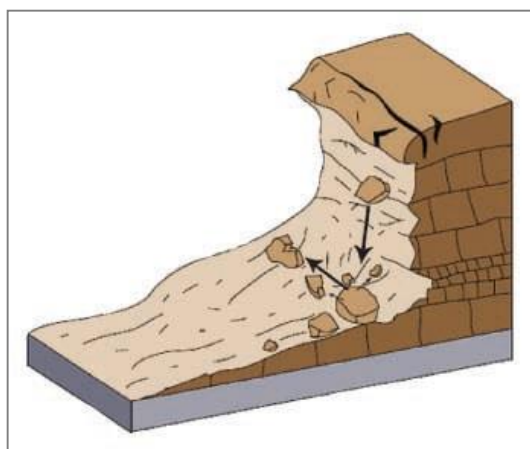


Figura 12-Esquema representativo de balançamento, extraído de HIGHLAND and

O grupo de trabalho da UNESCO definiu **deslizamento (slide)** como *um movimento de solo, ou rocha que ocorre predominantemente ao longo de planos de rutura ou de zonas relativamente estreitas, alvo de intensa deformação tangencial* (WP/WLI, 1993b, pp. 6-2). O

movimento inicialmente não ocorre de forma simultânea por toda a área. O material deslocado aumenta a partir de uma determinada área no local da rutura. Este tipo de processo inicia-se quando a resistência ao corte dos terrenos é ultrapassada pela tensão tangencial dos materiais na vertente (Ayala, 1991, in ZÊZERE, 1997b). Aquando da iniciação do movimento, determinados sinais são visíveis na superfície de rutura, nomeadamente fissuras/fendas, indicadoras da direção de deslocação (CRUDEN and VARNES, 1996b).

Uma vez que existe distinção quanto ao tipo de rutura tangencial, este tipo de processo subdivide-se em dois grupos: translacionais e rotacionais (tabela 3).

Tabela 3- Classificação dos tipos de deslizamentos proposta por DIKAU (1996) adaptada de ZÊZERE (1997b).

TIPOS DE DESLIZAMENTOS		TIPO DE MATERIAIS		
		ROCHA	DETRITOS	SOLO
ROTACIONAIS		SIMPLES MÚLTIPLO SUCESSIVO	SIMPLES MÚLTIPLO SUCESSIVO	SIMPLES MÚLTIPLO SUCESSIVO
TRANSLACIONAIS	NÃO ROTACIONAIS	DESLIZAMENTO DE ROCHA EM BLOCO (<i>BLOCK SLIDE</i>)	DESLIZAMENTO DE DETRITOS EM BLOCO (<i>BLOCK SLIDE</i>)	DESLIZAMENTO DE SOLO EM BLOCO (<i>SLAB SLIDE</i>)
	PLANARES	DESLIZAMENTO DE ROCHA (<i>ROCK SLIDE</i>)	DESLIZAMENTO DE DETRITOS (<i>DEBRIS SLIDE</i>)	DESLIZAMENTO LAMACENTO (<i>MUDSLIDE</i>)

O **deslizamento rotacional** ocorre ao longo de uma superfície curva e côncava (em forma de colher) (figura 13). *Se a superfície de rutura for circular ou até mesmo cicloidal, no perfil do movimento impõe-se que a massa deslocada se pode mover ao longo da superfície interna, sofrendo pouca deformação* (CRUDEN and VARNES, 1996b, p. 56). A cabeça (*head*) do material deslocado (faixa de contato entre o material deslocado e a cicatriz principal) pode mover-se quase verticalmente em sentido descendente, enquanto a superfície superior do material deslocado inclina em direção à escarpa (CRUDEN and VARNES, 1996b).

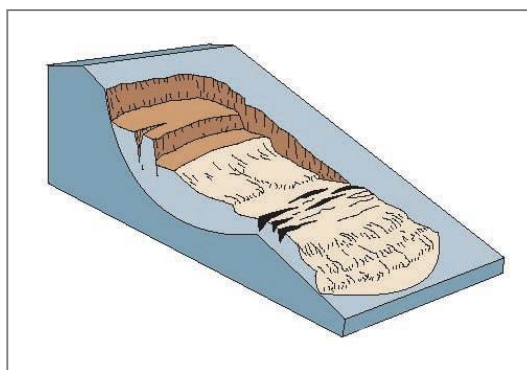


Figura 13- Esquema representativo de um deslizamento rotacional, extraído de HIGHLAND

Ou seja, o movimento evolui por rotação, que se reflete num abatimento na parte montante do deslizamento e consequentemente um levantamento no setor frontal, formando aclives que potenciam a instabilidade devido à acumulação e infiltração de água (Záruba e

Mencl, 1982, Hutchinson, 1988, in ZÊZERE, 1997b). Os deslizamentos rotacionais ocorrem frequentemente em materiais homogêneos (CRUDEN and VARNES, 1996b).

Em **deslizamentos translacionais** a massa desloca-se ao longo de uma superfície de rutura plana ou ondulada. Os deslizamentos translacionais são relativamente rasos se comparados com os rotacionais (CRUDEN and VARNES, 1996b). A superfície de rutura é frequentemente em forma de canal na secção transversal (Hutchinson, 1988, in CRUDEN and VARNES, 1996b).

Este processo pode subdividir-se em **deslizamentos translacionais planares e não rotacionais**.

Os deslizamentos **translacionais planares** (figura 14) desenvolvem-se ao longo de uma superfície planar ou pouco ondulada, onde a massa é frequentemente deslocada para além da superfície de deslizamento (Varnes, 1978, in ZÊZERE, 1997b, p. 53) . Este processo, segundo NEMCOK (1977), VARNES, (1978), BELL e PETTINGA (1988), ocorre normalmente em materiais homogêneos e característicos de meios anisotrópicos. O processo pode ocorrer ao longo de superfícies marcadas por uma fraca resistência ao corte, nomeadamente falhas, estratificação, diáclases ou mesmo o contacto entre uma cobertura de detritos e o substrato de rocha (in ZÊZERE, 1997b).

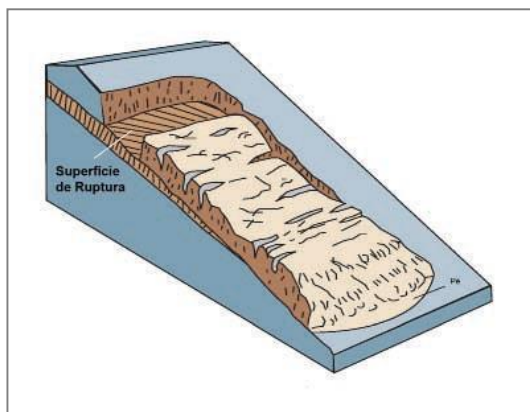


Figura 14-Esquema representativo de um deslizamento translacional planar, extraído de HIGHLAND and BOBROWSKY (2008).

Quanto aos **deslizamentos translacionais não rotacionais**, estes encontram-se na transição entre os deslizamentos rotacionais e os translacionais planares (ZÊZERE, 1997b). O plano de rutura apresenta duas secções: a montante com forma circular ou planar com elevada inclinação, a jusante apresenta-se em forma translacional com menor inclinação.

Segundo HUTCHINSON (1988), a geometria dos planos de rutura deste tipo de movimento vai condicionar o desenvolvimento de tensões internas na massa deslocada, acompanhada por diferentes movimentações (in ZÊZERE, 1997b).

A **expansão lateral (lateral spreads)** (figura 15) define-se pela *extensão de massas coesivas de solo ou rocha, combinada com uma subsidência geral (...) no material subjacente mais brando. A superfície de rutura não é uma superfície de cisalhamento intenso. Pode resultar da liquefação ou escoada do material brando subjacente* (WP/WLI, 1993b, pp. 6-2).

A expansão lateral pode ocorrer em rochas e em solos. A expansão lateral em rocha pode ser distinguida em dois tipos, tendo em conta a presença/ausência de liquefação ou escoamento plástico no material subjacente (Varnes, 1978, in CRUDEN and VARNES, 1996b).

As expansões laterais típicas de rocha estendem-se sem formar uma superfície de rotura

identificável, sobrepondo-se a materiais liquefeitos ou materiais que fluem plasticamente (CRUDEN and VARNES, 1996b). Quando ocorre em rocha consistente caracteriza-se por ser bastante lento (Pasuto e Soldati, 1996, in ZÊZERE, 1997b).

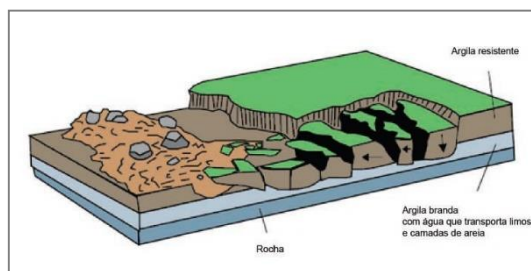


Figura 15- Esquema representativo de expansão lateral, extraído de HIGHLAND and BOBROWSKY

A expansão lateral em solos apresenta-se como um processo bastante rápido e caracteriza-se pelo *colapso de uma camada de solo a uma certa profundidade, seguido do assentamento das camadas sobrejacentes mais resistentes ou da rutura progressiva de toda a massa afetada* (Buma e Van Asch, 1996, in ZÊZERE, 1997b, p. 55).

Os **fluxos** caracterizam-se (figura 16) por ser um *movimento espacialmente contínuo onde as superfícies de tensão tangencial são efémeras e frequentemente não preservadas. A distribuição das velocidades na massa deslocada assemelha-se à de um fluido viscoso* (WP/WLI, 1993b, pp. 6-2). Considera-se que *o limite inferior da massa deslocada pode ser uma superfície ao longo da qual o movimento diferencial apreciável tenha ocorrido ou de uma zona de cisalhamento de espessura distribuída* (CRUDEN and VARNES, 1996b, p. 64).

É feita uma distinção entre fluxo de rocha, de detritos e de lama/terra, sendo que os fluxos de rocha se caracterizam por deformações gravíticas profundas (*creep*), afetando massas de rochas estratificadas ou com a presença de muitas diáclases, visíveis em vertentes montanhosas (Bisci et al., 1996, in ZÊZERE, 1997b). São, segundo VARNES (1978), movimentos bastante lentos e mais ou menos permanentes no tempo (in ZÊZERE, 1997b).

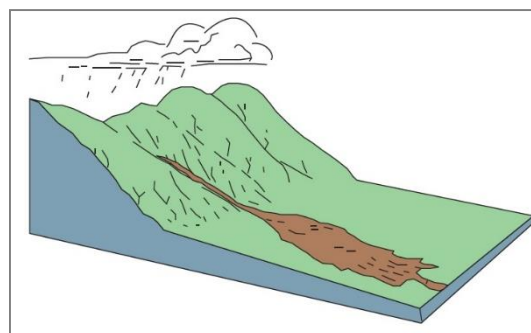


Figura 16-Esquema representativo de fluxos/escorregamentos, extraído de HIGHLAND and BOBROWSKY (2008).

Quanto aos fluxos de detritos, *são compostos por uma mistura de material fino nomeadamente areia, silte e argila e material mais grosseiro como calhaus e blocos, possuindo uma quantidade de água diversificada, formando uma massa que se desloca em direção à base*

da vertente devido a impulsos contínuos incitados pela gravidade e pelo colapsar dos materiais de suporte (Corominas et al, 1996, in ZÊZERE, 1997b, p. 56).

As subdivisões face a este tipo de classificação baseia-se em critérios geomorfológicos, localização geográfica, mecanismos de iniciação do movimento, velocidade do processo, dimensão dos materiais e origem e forma dos depósitos (ZÊZERE, 1997b).

De acordo com VARNES (1978), os **movimentos complexos** combinam um ou mais dos principais tipos de movimentos de vertente em diferentes sectores do material afetado, ou em diferentes estádios do desenvolvimento de um processo (in TEIXEIRA, 2012, p. 22).

2.3 FATORES DESENCADEANTES E CONDICIONANTES DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

A instabilidade de vertentes pode ser causada por fatores condicionantes e desencadeantes (figura 17). As causas podem ser geológicas, morfológicas, físicas e humanas (CRUDEN and VARNES, 1996b), pelo que normalmente se subdividem em dois grandes grupos: as naturais e as antrópicas.

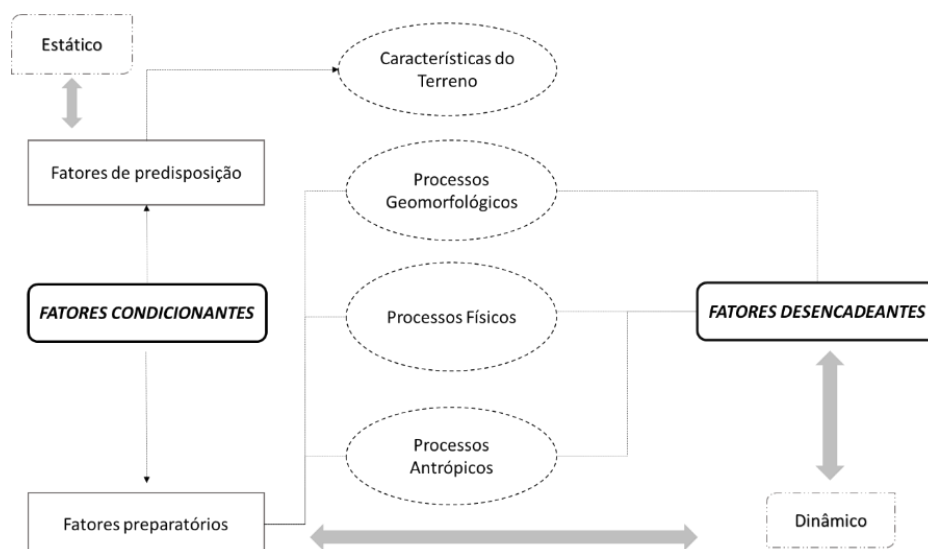


Figura 17-Fatores condicionantes e desencadeantes dos movimentos de vertentes. Adaptado de GARCIA (2012).

Os fatores desencadeantes são considerados fatores dinâmicos na medida em que variam no tempo e no espaço. São fatores responsáveis pela causa imediata da instabilidade. Enquadrado no grupo dos fatores preparatórios, são distinguidos dos fatores preparatórios condicionantes não pelo processo em si, mas pelo efeito que provocam na estabilidade das

vertentes³ (GARCIA, 2012). Existem alguns fatores desencadeantes responsáveis pelos movimentos de vertentes, nomeadamente a precipitação, os terremotos, as tempestades e as erupções vulcânicas (WIECZOREK, 1996).

A precipitação é entendida como o principal fator desencadeante em Portugal continental, distinguindo-se entre chuvas intensas e concentradas, ou abundantes e prolongadas (Zêzere, 1997a; Pereira, 2009). Mas os limiares de precipitação, ou seja, os valores a partir dos quais estão reunidas as condições para a ocorrência de movimentos, vão depender das características geológicas, geomorfológicas e climáticas (WIECZOREK, 1996). O efeito da precipitação nas vertentes remete para a perda de coesão dos materiais do solo, pelo que a tensão normal e a resistência do solo ao cisalhamento é diminuída (SELBY, 1993a). A precipitação pode levar à *diminuição da resistência ao corte pela redução da coesão aparente, ou ainda devido ao aumento das pressões intersticiais nos planos de rotura potenciais* (ZÊZERE, 1997b, p. 101). WIECZOREK (1996) faz referência à relação existente entre a intensidade pluviométrica e a ativação das ruturas nas vertentes⁴. Outros fatores como criação de taludes e a alteração do uso do solo são também considerados fatores desencadeantes, mas de cariz antrópico (WIECZOREK, 1996).

Relativamente aos fatores condicionantes, estes podem ser distinguidos em fatores preparatórios e de predisposição. Os fatores condicionantes preparatórios são dinâmicos e caracterizam-se por reduzirem a estabilidade das vertentes, no entanto não são responsáveis pelo desencadear do processo. São incluídos neste grupo os fatores geomorfológicos (a tectónica), processos físicos (os sismos, o degelo) e antrópicos (a desflorestação e a criação de taludes) (GARCIA, 2012). Os fatores condicionantes de predisposição são estáticos e refletem as características do terreno (i.e. litologia, declives). Individualmente, estes fatores não dão origem ao desenvolvimento dos processos. Funcionam como incentivos à ocorrência, em conjunto com os fatores dinâmicos (GLADE [et al.], 2005). Mas apesar de serem estáticos, não significa a ausência de alterações a médio e longo prazo.

A litologia irá influenciar a maior ou menor permeabilidade do solo, potenciando a infiltração (TEIXEIRA, 2012). Os planos de xistosidade, rede de fracturação são favoráveis à ocorrência de instabilidade em vertentes (BATEIRA, 2001). Neste seguimento, a condutividade

³ Estabilidade marginal nos fatores preparatórios condicionantes e instabilidade ativa nos fatores desencadeantes. Garcia, R. A. C. - Metodologias de Avaliação da Perigosidade e Risco associado a Movimentos de Vertente. Aplicação na bacia do rio Alenquer Lisboa: Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território 2012. Doutor .

⁴ A importância da precipitação na área de estudo pode ser analisada em Fernandes, J.; Soares, L.; Bateira, C.; Faria, A.; Oliveira, A. S.; Teixeira, M.; Hermenegildo, C. - MODRIS: Suscetibilidade a processos hidrogeomorfológicos no Norte de Portugal: modelação matemática de base física e de base estatística. Porto: Letras Departamento de Geografia Física 2014.

hidráulica possui implicações nos mecanismos de rutura, associados à saturação e a descontinuidades no interior do solo. A alteração deste parâmetro conforme a profundidade gera instabilidade em vertentes, porque *define o fluxo paralelo e o fluxo descendente vertical* (FERNANDES [et al.], 2004, p. 171).

As características do terreno são considerados fatores condicionantes que exercem forte influência à ocorrência de movimentos de vertente (MONTGOMERY and DIETRICH, 1994). Aqui destaca-se o declive, a curvatura, a área de contribuição e a orientação das vertentes.

O declive da vertente assume importância na medida em que são desenvolvidos movimentos por ação da gravidade, (TEIXEIRA, 2012) afetando as condições hidrológicas e a análise de estabilidade (FERNANDES [et al.], 2004).

A exposição das vertentes, relaciona-se com o ciclo de humidade. Uma maior capacidade de infiltração é responsável pelo aumento de humidade no interior do solo e direta ou indiretamente na instabilidade das vertentes (TEIXEIRA, 2012). Este parâmetro exerce também influência na vegetação e estrutura das rochas (FERNANDES [et al.], 2004).

Outro fator a considerar é a forma das vertentes, que podem apresentar um traçado retilíneo, côncavo e convexo. O fluxo superficial e subsuperficial apresenta comportamentos diferentes face à forma da vertente (FERNANDES [et al.], 2004). Na concavidade promove a concentração do fluxo e dispersão nas vertentes convexas. Os setores côncavos controlam a distribuição espacial das zonas saturadas e o desenvolvimento de pressões críticas nos poros (FERNANDES [et al.], 2004). Nos setores côncavos da vertente, há uma maior concentração de água e sedimentos, levando a um aumento da humidade, o que potencia uma maior perda de estabilidade da vertente em situações intensas de precipitação (Montgomery et al, 1991, in TEIXEIRA, 2012).

A área contributiva da bacia hidrográfica também se evidencia como um fator condicionante importante, pelo fato de definir a localização de segmentos convergentes levando à concentração de fluxos superficiais e subsuperficiais, que promovem a saturação do solo (FERNANDES [et al.], 2004, MONTGOMERY and DIETRICH, 1994).

Os fatores físicos como a coesão, a resistência do solo, a espessura do solo e o peso específico são de igual modo tidos como fatores condicionantes.

2.4 HIDROLOGIA DAS VERTENTES

2.4.1 Conceitos de escoamento- Modelo de escoamento Hortoniano

O fluxo de escoamento pode se descrito de acordo com o modelo de HORTON (1933) (figura 18). Este modelo resulta da relação entre três conceitos fundamentais, nomeadamente a intensidade de precipitação, a capacidade de infiltração e a humidade do solo. Tendo em conta estes conceitos, podem ocorrer essencialmente quatro tipos de escoamento.

O escoamento superficial ocorre quando a intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração do solo e o total de infiltração é superior ao défice de humidade do solo, repercutindo-se no aumento do fluxo subterrâneo. No entanto, se o total de precipitação for inferior ao défice de humidade do solo, não se verifica aumento do fluxo subterrâneo. Esta situação ocorre em superfícies impermeáveis ou pelo escoamento verificado pelo tronco das árvores (SELBY, 1993a). Por outro lado, quando a intensidade de precipitação é inferior à capacidade de infiltração, não se verifica fluxo superficial sendo que o total de infiltração, superior ao défice de humidade no solo, permite o aumento do fluxo subterrâneo. Em caso do total de infiltração ser inferior ao défice de humidade do solo, evidencia-se insuficiente para aumentar o fluxo subterrâneo. Outros tipos de escoamento podem ser verificados na figura 19.

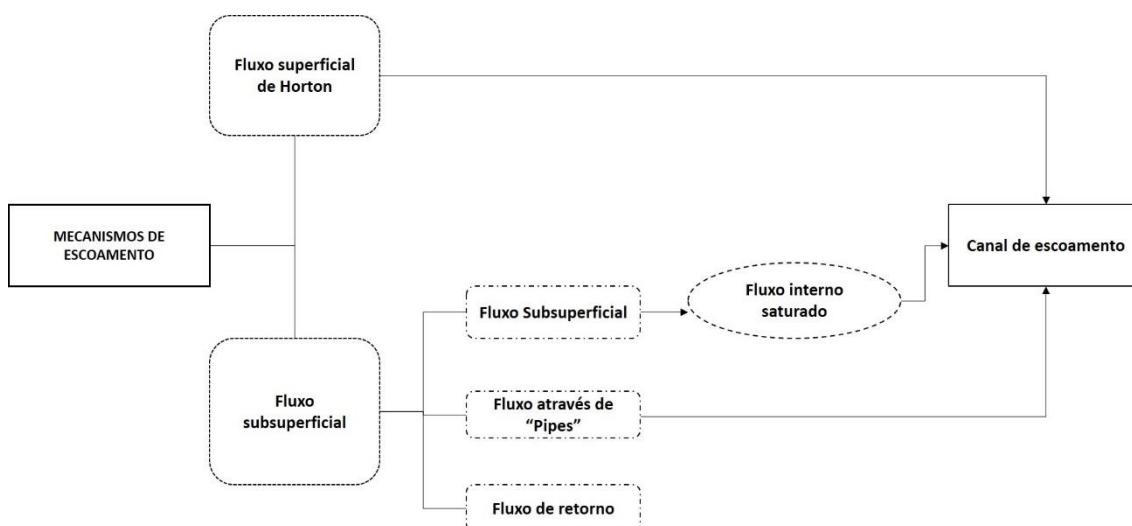


Figura 18- Mecanismos de escoamento em tempestades. Adaptado de SELBY (1993a).

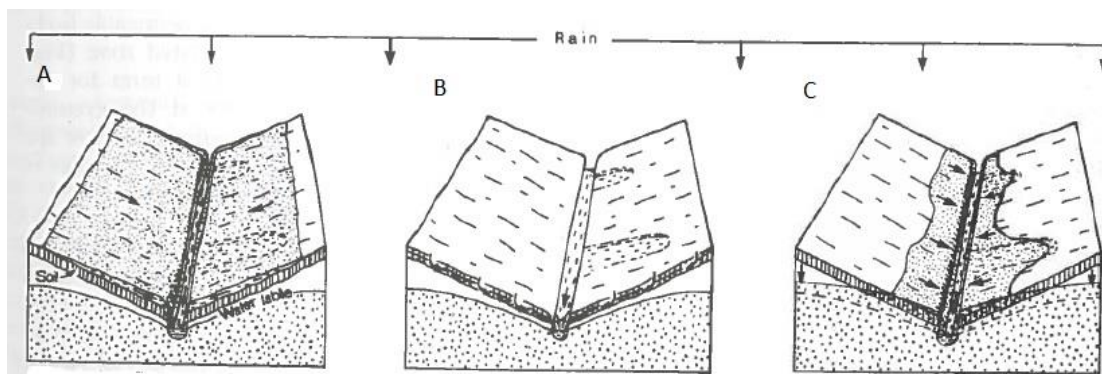


Figura 19- Os vários tipos de escoamento em vertentes com os caminhos de escoamento. A – fluxo superficial de horton ; B- fluxo subsuperficial; C- fluxo interno saturado. Adaptado de SELBY (1993a).

2.4.2 Fluxo subsuperficial

De acordo com SELBY (1993), o fluxo subsuperficial pode ser gerado por dois mecanismos. Um primeiro mecanismo (o chamado fluxo interno rápido) onde o fluxo circula através dos macroporos. O outro mecanismo, o fluxo interno lento, é baseado na lei de Darcy (SELBY, 1993a).

O fluxo através dos macroporos é restringido a períodos em que os espaços vazios são preenchidos por água capilar, que vai depender da capacidade de campo. Esse processo não ocorre com precipitação e humidade de solo fracas.

O fluxo interno lento (baseado na lei de Darcy) ocorre quando os horizontes superiores do solo são bastante permeáveis e saturados. Com o lençol freático elevado, a zona capilar estende-se à superfície do solo. Neste caso, apenas uma pequena quantidade de água é necessária para causar a subida do nível freático (Hewlett e Hibbert, 1967, Anderson e Burt, 1982, in SELBY, 1993a). O lençol freático tende a estar perto da superfície do solo nas concavidades da vertente, onde as secções médias e a base das vertentes se unem. Estes locais são propícios à convergência de água de diversas fontes, promovendo a saturação e as condições para a ocorrência de processos geomorfológicos (SELBY, 1993a).

2.4.3 Fluxo interno saturado

O fluxo interno saturado ocorre em áreas saturadas, o que impossibilita a infiltração da água. Os locais que sofrem deste processo são normalmente áreas com saturação sazonal ou ocorre durante tempestades (Dunne, 1978, in SELBY, 1993a). Este fluxo acaba por ser uma mistura de fluxo de retorno e do escoamento direto proveniente da precipitação.

Em solos permeáveis, a proporção de área de captação a produzir este fluxo é pequena. Pelo contrário, solos pouco permeáveis em áreas húmidas necessitam de áreas de maior

dimensão para produzir o mesmo efeito. Nesta situação, a proporção de água perdida por fluxo de tempestade pode ser elevada.

Nas inundações que ocorrem em bacias hidrográficas de regiões montanhosas, mas que não sofrem de escoamento superficial hortoniano, o fluxo interno de saturação possui importância nas áreas de captação, que acabam por se expandir durante períodos de tempestade. As áreas de contribuição do escoamento em situações de tempestade desenvolvem-se primeiro ao longo de canais na secção a jusante das bacias hidrográficas e em concavidades nos cursos de água de 1ª ordem e depois expande-se como escoamento superficial que decorre do desenvolvimento de vários tipos de processos (figura 20).

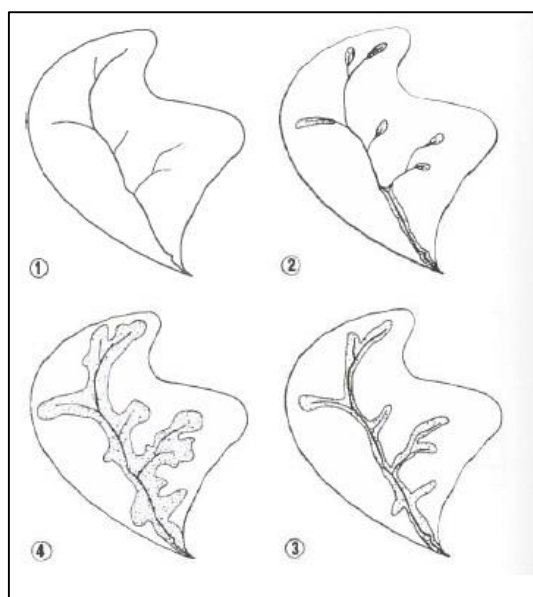


Figura 20- Área de origem e de expansão para canais de escoamento durante uma tempestade. Extraído de SELBY (1993a).

2.5 (INS) ESTABILIDADE DAS VERTENTES

O modelo de estabilidade avalia e incorpora os fatores físicos e parâmetros condicionantes necessários que ditam a (in) estabilidade das vertentes. Os movimentos de vertente ocorrem em vertentes ativas por ação natural, pelo facto destas estarem sujeitas a diversas tensões, umas que facultam a estabilidade, outras que incentivam a instabilidade.

A estabilidade das vertentes é avaliada segundo o Fator de Segurança (FS). Resulta na razão entre o somatório das forças que impulsionam a instabilidade (T) e as forças opostas, que mantêm o equilíbrio da vertente, as chamadas forças de resistência ao cisalhamento (τ) (equação 1 e 2).

Equação 1

$$FS = \frac{\text{Força de Resistência}}{\text{Tensão de Cisalhamento}}$$

Equação 2

$$FS = \frac{\sum \tau}{\sum T}$$

Quando as forças de resistência ao cisalhamento (τ) são iguais às forças impulsionadoras (T), o valor do fator de segurança é igual a 1, evidenciando a estabilidade limite das vertentes. Sendo superior a 1 ($FS > 1$), ou seja, quando as forças de resistência (τ) ultrapassam as forças de cisalhamento (T), a vertente considera-se estável. Neste caso, quanto maior o valor de FS maior será a estabilidade da vertente. Quando o Fator de Segurança é inferior a 1 ($FS < 1$), significa que a tensão de cisalhamento é superior à força de resistência, repercutindo-se na instabilidade das vertentes. Há que salientar que estes valores representam apenas uma probabilidade, com diversos graus de incerteza (SELBY, 1993b).

A teoria do FS baseia-se na lógica bidimensional do talude infinito (SELBY, 1993a). Este modelo considera uma massa ou bloco com uma espessura uniforme e homogênea num plano inclinado, em que forças/tensões atuam. Portanto, a força de gravidade (g) atua verticalmente (aumentando o atrito do bloco com a superfície inclinada o que acresce a estabilidade da vertente) e, ao mesmo tempo, ao longo do plano de rotura (contribuindo para o deslocamento) (VIEIRA, 2007, p. 17). A tensão normal (σ) atua de forma perpendicular ao plano de rotura e acaba por ser influenciada pela pressão da água no solo (μ), que é oposta à tensão normal (σ) (SELBY, 1993a).

Como se pode observar na figura 21, as tensões marcadas a vermelho, nomeadamente a gravitacional (g), a tensão de cisalhamento (T) e a pressão da água (μ), representam as tensões/ forças responsáveis pela criação de instabilidade da vertente; por oposição, a tensão normal (σ) restabelece a estabilidade da vertente. A tensão normal é ainda confrontada com a pressão oposta da água (μ).

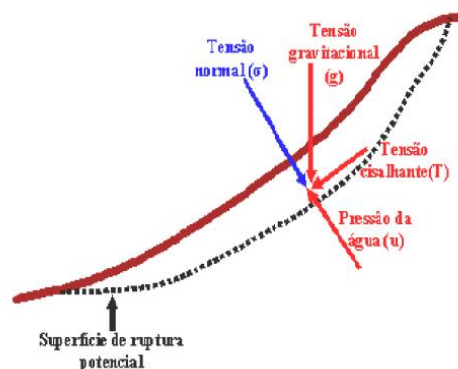


Figura 21 -Tensões/forças que atuam sob uma superfície potencial de rotura. Adaptado de SELBY (1993a).

2.5.1 Teoria do Talude Infinito

O modelo do talude infinito foi criado por Coulomb em 1773. Esta teoria considera a vertente como homogênea e com uma massa uniforme. São desconsideradas irregularidades no topo e na base. As propriedades do solo e humidade do solo são consideradas constantes a qualquer profundidade do solo (Graham, 1984, in TEIXEIRA, 2012).

Mohr-Coulomb reproduziu a equação do talude infinito que representa em termos matemáticos a resistência ao cisalhamento (S) em determinada vertente, que corresponde, de certa forma, à tensão normal (σ), coesão do solo (c') e ângulo de atrito interno (ϕ') (equação 3).

Equação 3

$$S = c' + (\sigma - u)\tan\phi'$$

Onde:

S - é a resistência ao cisalhamento em qualquer ponto do solo;

c' - representa a coesão efetiva;

σ - refere-se à tensão normal imposta pelo peso dos sólidos e da água;

ϕ' - remete para o ângulo de atrito.

Na realidade, a tensão normal [$(\sigma) = w \cos\beta$ (onde $w = \gamma z \cdot \cos\beta$)] pode ser representada, no plano de rutura, da seguinte forma:

Equação 4

$$S = c' + (\gamma z \cdot \cos^2\beta - \mu)\tan\phi'$$

O parâmetro Z representa a espessura do solo medida no terreno. Em caso de impossibilidade de obter a espessura do solo perpendicularmente à superfície, é calculado de acordo com a figura 22:

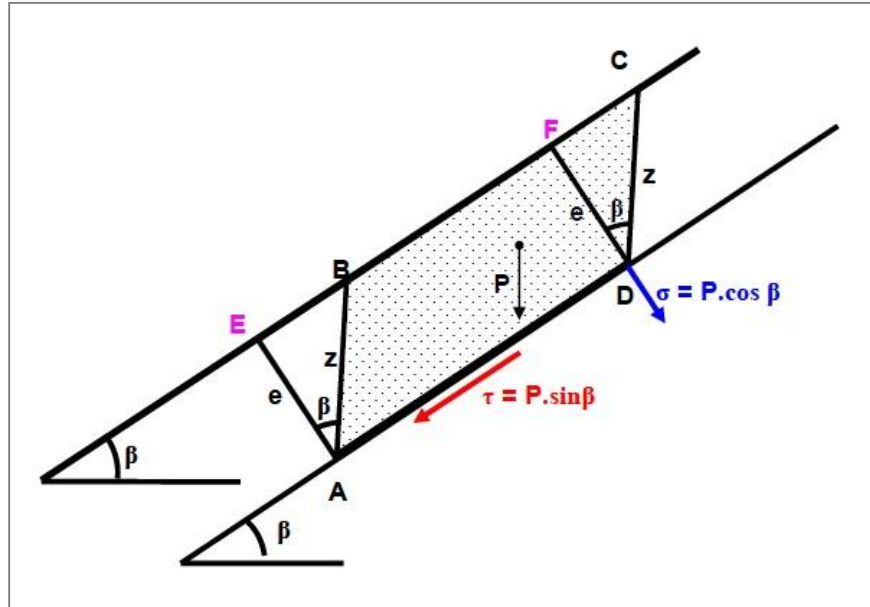


Figura 22 - Diagrama que evidencia a determinação da espessura do solo por medidas verticais do bloco. Sendo que $e = z \cdot \cos \theta$. Extraído de VIEIRA (2007, p. 19).

A equação 5 representa a equação modificada de Coulumb, pelo fato de ser considerado o papel da água (u), nomeadamente a influência da altura da coluna saturada de solo acima da superfície de rutura. Assume-se importante pelo fato de levar à redução da resistência e da coesão do solo.

A tensão cisalhante (T) representa o peso (produto entre a massa e a força da gravidade) do bloco, ou seja $T = w \cdot \text{sen} \beta$. Desta forma T pode ser representado pela seguinte fórmula:

Equação 5

$$T = \gamma z \cdot \cos \beta \cdot \text{sen} \beta$$

Portanto, as forças e tensões representadas pela teoria do talude infinito que compõe o FS, podem ser representadas pela equação:

Equação 6

$$FS = \frac{c' + (\gamma z \cos \beta^2 - \mu) \tan \phi}{\gamma z \cos \beta \text{sen} \beta}$$

2.6 SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS DE VERTENTE

2.6.1 Métodos de análise

Os métodos de análise utilizados para atribuir diferentes níveis de suscetibilidade, podem ser classificados como qualitativos, quantitativos, diretos ou indiretos (GUZZETTI [et al.], 1999a). As metodologias podem variar (figura 23) entre métodos heurísticos, mapas geomorfológicos, combinação de mapas qualitativos, mapas de inventário, métodos estatísticos e matemáticos (GUZZETTI [et al.], 1999b, VAN WESTEN [et al.], 2000, WESTEN [et al.], 2006).

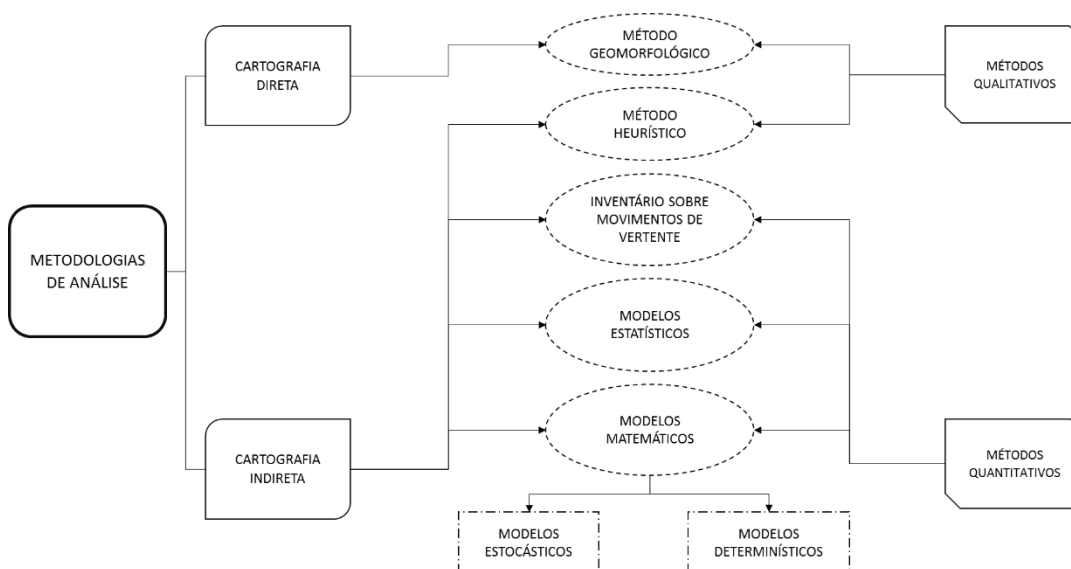


Figura 23- Métodos de análise da suscetibilidade aplicados a movimentos de vertentes.

2.6.2 Cartografia direta, indireta, métodos qualitativos e quantitativos

Relativamente aos **métodos heurísticos** e de acordo com SOETERS and VAN WESTEN (1996), estes podem ser divididos entre métodos heurísticos de análise geomorfológica e combinação de mapas qualitativos. O **método de análise geomorfológica** é considerado um método de cartografia direta e baseia-se em métodos qualitativos. Considerado, segundo PANIZZA (1975), uma das metodologias mais simples dentro do grupo, é condicionado pela experiência do investigador quanto à análise e zonamento. Neste tipo de metodologia os mapas de estabilidade de vertentes desenvolvem-se a partir de mapas geomorfológicos de detalhe (in ALEOTTI and CHOWDHURY, 1999). Esta metodologia pode ser utilizada a várias escalas, podendo por isso ajustar-se às necessidades locais. A análise geomorfológica de campo determina a identificação dos processos de instabilidade e a classificação do terreno de acordo com o tipo e grau de atividade dos movimentos (ALEOTTI and CHOWDHURY, 1999).

A **combinação de mapas qualitativos** é considerada um método de cartografia indireta e qualitativa. Há uma dependência da atuação e conhecimento do investigador sobre os processos geomorfológicos. Baseia-se no conhecimento *à priori* das causas e fatores de instabilidade na área em estudo. Nesta metodologia, *os fatores de instabilidade são ponderados tendo em conta a sua importância assumida/esperada na ocorrência de movimentos* (GUZZETTI [et al.], 1999b, p. 186, SOETERS and VAN WESTEN, 1996, p. 135).

Os **mapas de inventário** são considerados um método de cartografia indireta e quantitativo. Baseiam-se no levantamento, localização e caracterização de movimentos de vertente no terreno. Esse levantamento pode ser realizado no campo ou de forma remota, por meio de fotografias aéreas, imagens de satélite ou até mesmo de informação histórica (WESTEN [et al.], 2006). Aquando do levantamento, é realizada uma ficha inventário no sentido de se conhecer melhor o território, nomeadamente as características e tipologia dos movimentos de vertente, assim como as características da área em estudo, de forma a fornecer informações específicas sobre os fatores condicionantes da instabilidade.

A utilização dos modelos matemáticos de base física e base estatística, fazem uso do inventário como um passo importante da modelação (base estatística) e validação de resultados (ambos) (BORGIA [et al.], 2002, MALAMUD [et al.], 2004, MEISINA and SCARABELLI, 2007, PEREIRA [et al.], 2014).

De acordo com WESTEN [et al.] (2006), a falta de um inventário relativo a movimentos de vertente pode trazer problemas no desenvolvimento das relações de vulnerabilidade e na validação de mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente. É importante que o inventário seja uma base de dados completa, com informação datada, com o tipo de ocorrência, o local da ocorrência e as características do processo, entre outros dados considerados relevantes.

Em Portugal Continental já existe uma base de dados completa relativa a eventos hidrológicos e geomorfológicos com consequências danosas nas pessoas, resolvendo assim algumas lacunas existentes relativas a este ponto (ZÊZERE [et al.], 2010a). Ainda assim, não é utilizada para modelação de suscetibilidade por não conter os eventos que não provocaram danos pessoais. Neste tipo de metodologia a distribuição dos pontos de instabilidade podem ser representados sob a forma de um mapa de densidade (SOETERS and VAN WESTEN, 1996).

O método **estatístico** é considerado um método de análise indireto e quantitativo. São incorporados em ambiente SIG todos os fatores condicionantes, sendo realizada a sobreposição de cada fator condicionante e o mapa resultante do inventário realizado. Este método baseia-se na suposição de que os fatores influenciadores no passado de instabilidade serão os causadores de instabilidade futura. Em suma, as técnicas estatísticas, segundo CARRARA (1988), são usadas para analisar a influência de cada fator na instabilidade de vertentes (in ALEOTTI and

CHOWDHURY, 1999). Este método possui a vantagem de ser o investigador a decidir os mapas finais de entrada (ALEOTTI and CHOWDHURY, 1999).

Os métodos estatísticos podem ser bivariados ou multivariados.

Na **análise estatística multivariada**, atribui-se uma ponderação aos fatores causais, sendo esses os fatores que contribuem para a definição do grau de suscetibilidade para cada unidade de terreno. A análise é feita tendo em conta a presença ou ausência de condições para o desenvolvimento de processos geomorfológicos, em cada unidade de terreno (Suzen e Doyuran, 2004, in TEIXEIRA, 2012). Segundo ALEOTTI and CHOWDHURY (1999) devido à grande quantidade de informação, a análise deverá ser realizada em ambiente SIG. As estatísticas multivariadas mais aplicadas são a *Análise Discriminante*, *Regressão Múltipla* e *Logística* (Carrara et al, 1991; Wieczorek et al., 1996; Dai e Lee, 2003, in ALEOTTI and CHOWDHURY, 1999).

Na **análise estatística bivariada**, cada fator é comparado individualmente com um mapa que representa os movimentos de vertente. Várias são as operações na aplicação deste tipo de metodologia (ALEOTTI and CHOWDHURY, 1999, p. 30), nomeadamente:

- Seleção e representação cartográfica dos parâmetros importantes;
- Representação cartográfica dos movimentos de vertente;
- Sobreposição do mapa representativo dos movimentos de vertente com o mapa de cada parâmetro;
- Determinação da densidade de deslizamentos em cada classe do respetivo parâmetro e definição da ponderação atribuída;
- Atribuição das ponderações aos vários parâmetros;
- Mapa final com as sobreposições e cálculo final da suscetibilidade a movimentos de vertente para cada unidade de superfície.

Como em todo tipo de metodologias esta também apresenta alguns inconvenientes, como a subjetividade associada principalmente à atribuição das ponderações aos vários parâmetros (ALEOTTI and CHOWDHURY, 1999). Apresenta também o inconveniente da simplificação dos fatores a considerar para a análise para determinada área de estudo como declives e litologia. O problema da generalização, pelo facto de se assumir que os movimentos de vertente ocorrem sob as mesmas combinações de fatores na área em estudo (WESTEN [et al.], 2003). Outro aspeto a salientar é o facto de cada movimento de vertente possuir o seu conjunto de fatores influenciadores, pelo que devem ser analisados individualmente (Kojima et al, 2000, in WESTEN [et al.], 2003). No entanto, apresenta a vantagem de ser o técnico a decidir

quais os fatores que melhor explicam os movimentos de vertentes ocorridos, produzindo influência na qualidade do mapa de suscetibilidade (WESTEN [et al.], 2003).

Existem vários métodos estatísticos passíveis de serem utilizados, a destacar o *Valor Informativo*, método do *Weights of Evidence*, regras de combinação *Bayesiana*, método de *Dempster-Shafer* e *Lógica Difusa*. Este tipo de metodologias podem ser aplicadas e desenvolvidas em Sistemas de Informação Geográfica (ALEOTTI and CHOWDHURY, 1999).

Por último, uma metodologia alicerçada nos modelos matemáticos **de base física**, onde se podem destacar os métodos **estocásticos e determinísticos** (ambos se definem como métodos de cartografia indireta e quantitativos).

Quanto à **abordagem determinística**, a suscetibilidade a movimentos de vertentes é determinada segundo o modelo de estabilidade de que resulta o cálculo do Fator de Segurança (FS). Estes modelos fornecem melhor informação quantitativa relativa à suscetibilidade. Devido à necessidade de grande quantidade de dados de detalhe e análises em laboratório e trabalho de campo, esta metodologia aplica-se a grandes escalas (WESTEN [et al.], 2006). As condições de estabilidade são avaliadas por um modelo estático, como o modelo do talude infinito, onde é considerado o equilíbrio local ao longo de uma superfície potencial ao deslizamento (GUZZETTI [et al.], 1999b). São utilizadas técnicas de geoprocessamento devido à envolvimento de um grande número de cálculos para a determinação do FS em grandes áreas. A aplicação destes modelos deverá ser em condições geomorfológicas e geológicas homogêneas e os movimentos de vertentes simples (SOETERS and VAN WESTEN, 1996).

2.7 MÉTODO ESTATÍSTICO- VALOR INFORMATIVO

Este método foi desenvolvido por YIN and YAN (1988) e aplicado por ZÊZERE (1997b), PEREIRA (2009) e TEIXEIRA (2012). Como é um método estatístico, são determinados *à priori* os parâmetros a considerar para o estudo. Os parâmetros normalmente usados remetem para a litologia, declive, exposição de vertentes e uso do solo, entre outras consideradas relevantes à ocorrência dos movimentos de vertente e à escala de análise. Portanto, o ponto de partida para a modelação estatística é a escolha dos parâmetros a considerar e a definição de unidades de terreno. Assim para cada parâmetro utilizado, calcula-se o Valor Informativo (VI) a partir da seguinte equação:

Equação 7

$$Ii = \log \frac{SI/NI}{S/N}$$

Em que:

Ii- representa o Valor Informativo da variável *i*;

SI- refere-se ao número de unidades de terreno com movimentos de tipo *y* e com a presença da variável *xi*;

NI- é o número de unidades de terreno com a presença da variável *xi*;

S- representa o número total de unidades de terreno com movimentos de tipo *y*;

N- refere-se ao número total de unidades de terreno.

Se *Ii* for negativo, significa que a variável não é determinante na ocorrência de movimentos de vertente. Se, pelo contrário, o resultado for positivo, indica a existência de uma relação entre o parâmetro e os processos de instabilidade, sendo que, quanto maior o *score* maior é essa relação (Yan, 1988, in ZÊZERE, 1997b).

O Valor Informativo total de uma unidade de terreno *j* é dada pela seguinte equação (YIN and YAN, 1988):

Equação 8

$$Ij = \sum_{i=1}^m Xji. Ii$$

Em que:

Ij- é o VI total;

m- é o número de variáveis;

Xji- é atribuído valor de 0 na ausência da variável na unidade de terreno, sendo que a presença da variável na unidade de terreno é atribuído o valor de 1.

Portanto, a aplicação do método do VI à avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente segue os seguintes procedimentos (PEREIRA, 2009, p. 225):

- Definir as unidades de terreno em raster;
- Elaborar matrizes binárias a partir das unidades de terreno, sob um determinado tipo de movimento de vertente;
- Calcular o Valor Informativo para cada classe de cada variável;

- Calcular o Valor Informativo final, através do somatório dos VI parciais (variáveis independentes presentes em cada unidade de terreno);
- Divisão final dos *scores* do Valor Informativo em classes de suscetibilidade, a partir da análise dos valores de unidade de terreno com movimentos de vertente (YIN and YAN, 1988).

2.7.1 Curva de sucesso e de predição

As taxas de sucesso e de predição calculam-se através de diferentes métodos, no entanto remetem para uma validação cruzada que permitem avaliar a qualidade do modelo de predição (CHUNG and FABBRI, 2008). A curva da taxa de sucesso é avaliada segundo a relação entre o mapa de predição e os movimentos de vertente que foram utilizados na construção do modelo. Deste modo, a curva evidencia o ajuste entre o modelo construído e os movimentos de vertentes utilizados para a modelação (pontos de treino) (PEREIRA, 2009).

A taxa de predição, é avaliada entre o mapa de suscetibilidade (obtido com o grupo de treino) com os movimentos de vertente do grupo de teste (validação)(PEREIRA, 2009).

2.7.2 Classificação dos mapas de suscetibilidade

Findada a construção do modelo e aplicando as taxas de sucesso e predição, a classificação do mapa final é o ponto-chave na interpretação do mapa. Não existe uma clara definição sobre a melhor classificação, pelo que é necessário adaptar o mapa de suscetibilidade à realidade aferida. Os SIG permitem fazer a classificação de forma simples e de forma automática, no entanto não significa que seja a mais correta, pelo fato de não existir uma justificação plausível à escolha das classes (PEREIRA, 2009) .

Sugere-se que a melhor representação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente deverá ter o maior número de movimentos de vertente na classe mais instável (suscetibilidade elevada) e na menor área, fornecendo uma melhor capacidade preditiva do modelo (PEREIRA, 2009). Existem algumas metodologias de classificação do mapa de suscetibilidade, a destacar (GARCIA [et al.], 2007, p. 273):

- Igual ao número de unidades de terreno. Este método divide a área em quatro partes iguais (quartis), em que cada classe equivale ao mesmo número de unidades de terreno;
- Igual amplitude, tendo em conta os valores máximo e mínimo dos *scores*, associado à análise discriminante de que resultam quatro classes com a mesma amplitude;
- Distribuição das unidades de terreno, baseada no diagrama de dispersão de todos os valores dos *scores* discriminantes;

- Distribuição das unidades de terreno instáveis, baseado na dispersão dos *scores* das unidades consideradas instáveis;
- Unidades de terreno instáveis nos níveis elevados, considerando que as unidades de terreno instáveis se encontram, ainda que forçosamente, nas duas classes de suscetibilidade mais elevada (elevada e muito elevada);
- Através da Curva de sucesso, com base na análise do declive apresentado pela curva, nomeadamente nas quebras.

2.7.3 Método de validação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente

A aplicação de qualquer metodologia necessita de validação, de forma a avaliarmos a capacidade preditiva do modelo utilizado. Para garantir qualidade no modelo utilizado, pode-se usar o mesmo conjunto de movimentos de vertentes usado para o modelo de predição, mas é cientificamente mais correta a utilização de um conjunto de movimentos de vertentes diferente e independente do que foi usado para a predição (CHUNG and FABBRI, 2003, Chung et al, 1995, in REMONDO [et al.], 2003). Portanto, um conjunto do inventário de movimentos de vertentes é usado para obter o mapa de predição, o outro conjunto é comparado com este mapa para validar os resultados (CHUNG and FABBRI, 2003).

A partição do inventário pode seguir três técnicas: a partição temporal, espacial e aleatória. A partição temporal, pressupõe a existência de movimentos de vertente com informação espacial e temporal, designadamente o conhecimento das suas datas de ocorrência.

Outra técnica utilizada é a partição espacial, sendo neste caso necessário um inventário/base de dados dos movimentos de vertentes passados, numa determinada área de estudo. Esta técnica assume as áreas circundantes com características de terreno semelhantes, o que se torna questionável pelo fato de poder haver variações locais entre as duas subáreas (CARRARA [et al.], 2008, CHUNG and FABBRI, 2003).

Por fim, a partição aleatória utiliza-se na falta de dados que permitam a realização da partição temporal e espacial, dividindo assim os movimentos de vertente em dois grupos de forma aleatória (PEREIRA, 2009). Esta técnica assume que os movimentos de vertente passados ainda não ocorreram. Ainda assim, uma distribuição espacial semelhante deve ser tida em conta nesta técnica (PEREIRA, 2009).

Mas neste trabalho, a metodologia de validação adotada é a de FAWCETT (2006). De acordo com esta metodologia (figura 24) são utilizadas as siglas Y e N para a classe de predição. Podem ser obtidos 4 resultados possíveis. Se é positivo, ou seja, se de facto ocorrerem deslizamentos e foi classificado como suscetível então será classificado como *True Positive* (TP).

Se por outro lado foi contabilizado como negativo, será classificado como *False Negative* (FN), ou seja, não é suscetível mas ocorreram movimentos de vertente. Por outro lado, se foi contabilizado como negativo e se de facto é negativo, ou seja, não é suscetível mas também não foram contabilizadas ocorrências de movimentos de vertente então é classificado com *True Negative* (TN). Se for contabilizado como positivo então é classificado como *False Positive*, ou seja, é suscetível mas não ocorreram movimentos de vertente. Desta forma podem ser calculadas taxas com o objetivo de avaliar a predição do modelo.

A taxa verdadeira positiva, ou a chamada taxa de acerto e/ou de recuperação pode ser obtida a partir da seguinte forma:

Equação 9

$$TPR = \frac{\text{Positivos corretamente classificados}}{P}$$

A taxa de falsos positivos (também denominada de taxa de falso alarme) pode ser conseguida através da seguinte fórmula:

Equação 10

$$FPR = \frac{\text{Negativos incorretamente classificados}}{N}$$

A fiabilidade pode ser determinada através de:

Equação 11

$$ACC = \frac{(TP + TN)}{(TP + FN + FP + TN)}$$

Por último pode ainda ser determinado a precisão através de :

Equação 12

$$PPV = \frac{TP}{TP + FP}$$

		Classe verdadeira	
		p	n
Classe modelada	Y	True Positives	False Positives
	N	False Negative	True Negative
		P	N

Figura 24- Classificação do método de validação. Adaptado de FAWCETT (2006).

2.8 MODELOS MATEMÁTICOS DE BASE FÍSICA

A aplicação de modelos matemáticos de base física tem sido utilizada na predição e determinação da suscetibilidade a movimentos de vertentes. Existem já vários trabalhos onde as metodologias de base física foram aplicadas (BORGIA [et al.], 1998, BORGIA [et al.], 2002, GOMES, 2006, TEIXEIRA, 2012, VAN BEEK and VAN ASCH, 2004, VIEIRA, 2007).

O SHASLTAB (*Shallow Landslide Stability Analysis*), é um modelo matemático de base física que calcula a suscetibilidade a deslizamentos rasos⁵ baseado num modelo hidrológico, considerando os parâmetros sem variação espacial, e num modelo de estabilidade (DIETRICH [et al.], 1995, MONTGOMERY and DIETRICH, 1994, MONTGOMERY and DIETRICH, 1989, MONTGOMERY [et al.], 1998).

Posteriormente surge o dLSAM (*Slope Instability Model*), em 1995, modelo baseado na teoria do talude infinito, um modelo subterrâneo das ondas cinemáticas, onde também a força da raiz da vegetação (importância do efeito de retenção do sistema radicular) é incorporada (WU and SIDLE, 1995).

Em 1998 surge a aplicação de um novo modelo matemático, o SINMAP (*Stability Index MAPPING*). O modelo baseia-se igualmente no índice de estabilidade de taludes, tendo por base a combinação de um modelo hidrológico em estado estacionário e o modelo de estabilidade com a teoria do talude infinito (PACK [et al.], 1998).

Por fim, mais recentemente, o modelo TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration And Grid-Based Regional Slope Stability*), modelo que evidencia as influências hidrológicas, topográficas e física dos solos na instabilidade das vertentes (BAUM [et al.], 2008, BAUM [et al.], 2002, IVERSON, 2000, KIM [et al.], 2010, LIAO [et al.], 2011).

2.8.1 SHALSTAB

O SHALSTAB é um modelo matemático de base física que tem por objetivo a determinação da variação espacial da suscetibilidade a movimentos de vertente. As condições hidrológicas utilizadas encontram-se em *steady-state*, ou seja em estado estacionário. São incorporados no modelo parâmetros mecânicos/físicos e topográficos dos solos. Este modelo compila na sua metodologia um modelo de estabilidade baseado na teoria do talude infinito e um modelo hidrológico em estado estacionário. Este surge na sequência de trabalhos de DIETRICH [et al.] (1993) e MONTGOMERY and DIETRICH (1994). No entanto só em 1998 se atribuiu o nome de SHALSTAB ao modelo já introduzido anteriormente (DIETRICH [et al.], 1998).

⁵ Ver tabela 1, Capítulo 2- Movimentos de Vertente- conceitos.

2.8.2 Modelo de estabilidade

Com base no modelo do talude infinito criado por Mohr-Coulomb, o modelo de estabilidade (sem coesão) incorporado no modelo SHALSTAB resume-se na seguinte equação:

Equação 13

$$\frac{h}{z} = \frac{ps}{pw} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right)$$

De uma forma simplificada, o modelo de estabilidade é estabelecido pela relação de h/z . O modelo pode ainda incorporar o parâmetro da coesão, o que reproduz resultados mais apurados e mais próximos da realidade, visto que a coesão é um parâmetro de grande importância da resistência ao cisalhamento. A não utilização do parâmetro coesão irá potenciar a instabilidade e fornecer resultados mais simplificados da realidade. Desta forma, a equação do modelo de estabilidade, utilizando o parâmetro da coesão, define-se na seguinte equação:

Equação 14

$$\frac{h}{z} = \frac{C'}{pw \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} + \frac{ps}{pw} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right)$$

Esta equação devolve a maior ou menor estabilidade da vertente, sendo que quanto maior for o resultado da relação h/z , reflete-se na estabilidade da vertente. Ou seja, a altura da coluna da água (h) deverá ser superior à espessura do solo (z). É por isso diretamente proporcional a relação h/z e a estabilidade. Uma outra relação diretamente proporcional é a instabilidade da vertente e o declive da mesma. Aumentando o declive da vertente aumenta a instabilidade.

2.8.3 Modelo hidrológico

O modelo hidrológico utilizado no SHALSTAB, considera a precipitação em estado estacionário com base num padrão espacial de saturação do solo em equilíbrio, partindo do modelo hidrológico de O'LOUGHLIN (1986). Baseia-se nas áreas contributivas (α) (figura 25), na transmissividade do solo (T) e nos declives (θ) (MONTGOMERY and DIETRICH, 1994).

O modelo traduz-se no índice de humidade (W), ou seja, na relação entre a altura da coluna de água e a espessura do solo (h/z). Para haver saturação do solo é necessário que o produto da área drenada a montante (α) e a precipitação (Q) que passa por um *pixel* de comprimento (b), seja maior que o produto da transmissividade (condutividade * espessura do solo) e o seno do ângulo da vertente (θ), como se pode verificar na seguinte fórmula:

Equação 15

$$a \frac{Q}{b} \geq T \sin \theta$$

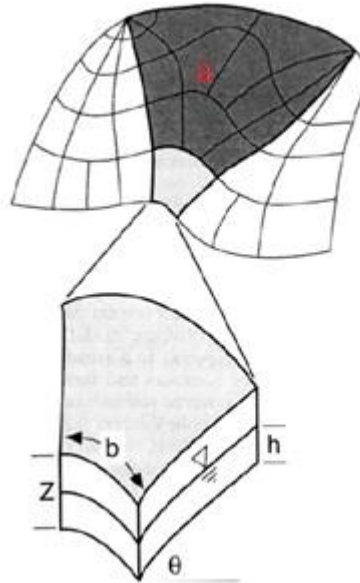


Figura 25- Elementos topográficos do modelo hidrológico considerado no SHALSTAB. Extraído de MONTGOMERY and DIETRICH (1994).

Quando o fluxo é constante, o grau de saturação do solo é determinado pelo índice de humidade (W). O índice de humidade engloba as relações Q/T (controlo hidrológico) e as relações $a/b \sin \theta$ (controlo topográfico). É descrito pela seguinte equação:

Equação 16

$$W = \frac{Q}{T} \cdot \frac{a}{b \sin \theta}$$

O modelo pode ainda ser descrito pela relação h/z , onde é considerado um fluxo de água inicial (q), que representa o produto da velocidade (v) pela área da secção transversal saturada (S), visível na seguinte equação:

Equação 17

$$q = v \cdot S$$

A lei de Darcy relaciona a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e o gradiente hidráulico (i). A lei de Darcy considera a velocidade como o produto entre K_{sat} e i .

Equação 18

$$v = K_{sat} \cdot i$$

Por conseguinte, o gradiente hidráulico (i), reflete a diferença entre a carga gravitacional ou de elevação entre dois pontos e a distância do comprimento entre eles (equação 19).

Equação 19

$$i = \frac{\Delta h_{total}}{L}$$

O comprimento L é igual ao $\text{sen}\theta$ e, por isso, pode ser substituído i por $\text{sen}\theta$. Assim, a lei de Darcy pode ser reescrita pela seguinte equação:

Equação 20

$$V = K_{sat} \cdot \text{sen}\theta$$

Já a área da secção transversal saturada (S), em função de h , é representada pela seguinte fórmula:

Equação 21

$$S = h \cdot \cos\theta$$

Em condições de carga constante, o produto da precipitação efetiva (q) pela área de contribuição (α), devolver-nos-á a quantidade de escoamento em determinado comprimento b . (MONTGOMERY and DIETRICH, 1994). Portanto, no modelo hidrológico o fluxo representa o produto da precipitação por unidade de tempo e a área drenada a montante (equação 22).

Equação 22

$$Qa = K_{sat} \cdot \text{sen}\theta \cdot h \cdot \cos\theta \cdot b$$

Relativamente à transmissividade (T), é o resultado entre o produto da condutividade hidráulica e a espessura do solo (e). Como (e) reflete $z \cdot \cos\theta$, este parâmetro pode ser escrito por:

Equação 23

$$T = K_{sat} \cdot z \cdot \cos\theta$$

Portanto, o denominador do modelo hidrológico pode ser reescrito pela seguinte equação:

Equação 24

$$T \cdot b \cdot \text{sen}\theta = K_{sat} \cdot z \cdot \cos\theta \cdot \text{sen}\theta \cdot b$$

O resultado da relação entre a precipitação efetiva pela transmissividade resulta na equação 16, sendo que a resolução da mesma, o modelo hidrológico, pode ser definido em função da razão de h/z de acordo com a seguinte equação:

Equação 25

$$\frac{h}{z} = \frac{Q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin\theta}$$

O efeito da topografia no escoamento é visível pela relação $(\alpha/b \sin\theta)$, e o seu aumento reflete a diminuição do $\sin\theta$. Assim, quanto maior o valor de h/z , significa maior valor de a em relação a b (TEIXEIRA, 2012). A equação 25 refere que em situação de precipitação de carga constante, da transmissividade, da área de contribuição (α/b) e do declive e da proporção da coluna de solo que pode saturar (humidade relativa). Em que h representa a espessura de solo saturado acima da camada impermeável e z é a espessura total do solo (Dietrich & Montgomery, 1998, Montgmorey et al., 1998, in TEIXEIRA, 2012).

2.8.4 Combinação do modelo de estabilidade e hidrológico

A fórmula final do SHALSTAB incorpora o modelo hidrológico (equação 25) e o modelo de estabilidade (equação 13). Pode ser expressa pela razão Q/T (relação hidrológica) e/ou por α/b (relação topográfica), sendo representados pelas seguintes equações, respetivamente:

Equação 26

$$\frac{Q}{T} = \frac{ps}{pw} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \frac{b}{a} \sin\theta$$

Equação 27

$$\frac{a}{b} = \frac{ps}{pw} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \frac{T}{Q} \sin\theta$$

Através da combinação dos dois modelos (hidrológico e de estabilidade) é obtida a fórmula que representa a quantidade de precipitação crítica (Q_c) ou fluxo de carga constante, para a ocorrência de movimentos de vertente (equação 28). Pode ainda ser incorporado o parâmetro da coesão do solo (equação 29), no sentido de apurar o modelo final.

Equação 28

$$\frac{Q_c}{T} = \frac{\sin\theta}{a/b} \left[\frac{ps}{pw} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \right]$$

Equação 29

$$\frac{Qc}{T} = \frac{\text{sen}\theta}{a/b} \left[\frac{c'}{p_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{p_s}{p_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right]$$

Portanto, a combinação dos modelos reflete o funcionamento do SHALSTAB, ou seja, é calculada a precipitação crítica de carga constante necessária ao desencadeamento de instabilidade em cada ponto, obtendo o potencial de deslizamento em determinada área (MONTGOMERY and DIETRICH, 1994). O resultado obtido pode ser classificado de acordo com vários graus de estabilidade (tabela 4), variando entre 'incondicionalmente instável' e 'incondicionalmente estável' (figura 26).

A equação final da estabilidade pode variar entre zero e o valor da razão p_s/p_w (declive igual a zero). Tendo em conta que a razão entre h/z varia entre 0 e 1, considerando o plano de rutura paralelo à encosta. A classe incondicionalmente instável verifica-se quando o declive é maior do que o ângulo de atrito ($\tan \theta \geq \tan \phi$), mesmo que o solo se encontre seco ($h/z=0$)

Pelo contrário, a classe incondicionalmente estável verifica-se quando a $\tan \theta$ é menor ou igual a $\tan \phi^6$ ($\tan \theta \leq \tan \phi$). Nesta situação, mesmo em saturação da vertente ($h/z=1$), a vertente é considerada estável.

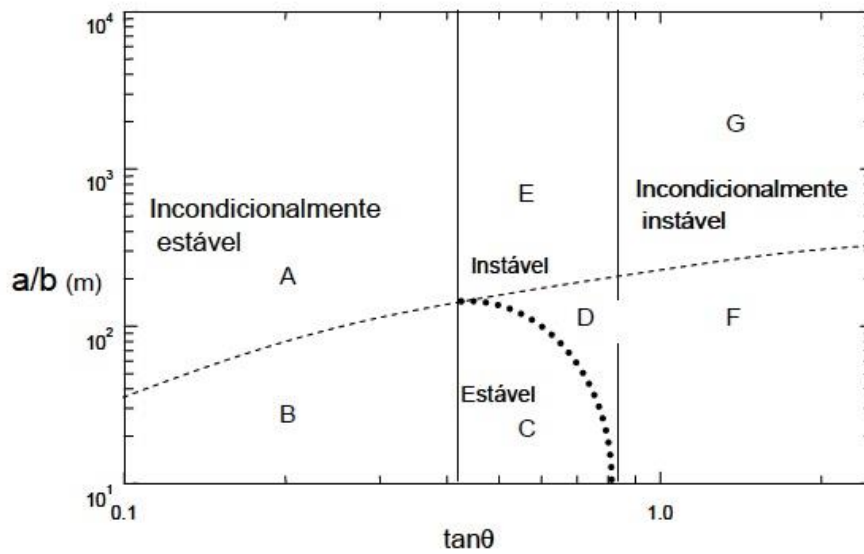


Figura 26 - Classes de estabilidade do SHALSTAB. Variação de a/b em função do declive ($\tan \theta$). O limite de saturação é representado pelo tracejado. A- incondicionalmente estável e saturado, B- incondicionalmente estável e não saturado, C- estável e não saturado, D- instável e não saturado, E- instável e saturado, F - incondicionalmente instável e não saturado, G- incondicionalmente instável e saturado. Extraído de VIEIRA (2007, p. 33).

⁶ $(1-(p_s-p_w))$

Tabela 4- Classes de estabilidade e saturação da combinação do modelo hidrológico com o modelo de estabilidade.
Adaptado de (TEIXEIRA, 2012).

CLASSE DE ESTABILIDADE	CONDIÇÃO
(A) Incondicionalmente Estável e Saturado	$\tan\theta \leq \tan\phi \left(1 - \frac{p_s}{p_w}\right); a/b > (T/Q)\text{sen}\theta$
(B) Incondicionalmente Estável e não Saturado	$\tan\theta \leq \tan\phi \left(1 - \frac{p_s}{p_w}\right); a/b < (T/Q)\text{sen}\theta$
(C) Estável e não Saturado	$\frac{a}{b} < \frac{p_s}{p_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$ $a/b < (Q/T) \text{sen}\theta; \tan\phi > \tan\theta > \tan\phi(1 - p_s/p_w)$
(D) Instável e Saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{p_s}{p_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$ $a/b > (Q/T) \text{sen}\theta; \tan\phi > \tan\theta > \tan\phi(1 - p_s/p_w)$
(E) Instável e não Saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{p_s}{p_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$ $a/b < (Q/T) \text{sen}\theta; \tan\phi > \tan\theta > \tan\phi(1 - p_s/p_w)$
(F) Incondicionalmente Instável e Saturado	$\tan\theta > \tan\phi; a/b > (T/Q) \text{sen}\theta$
(G) Incondicionalmente Instável e não Saturado	$\tan\theta > \tan\phi; a/b < (T/Q) \text{sen}\theta$

CAPÍTULO 3- MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA

O esquema da figura 27 reflete a sequência metodológica utilizada nesta dissertação, pormenorizando-se as diferentes fases de trabalho nos pontos seguintes.

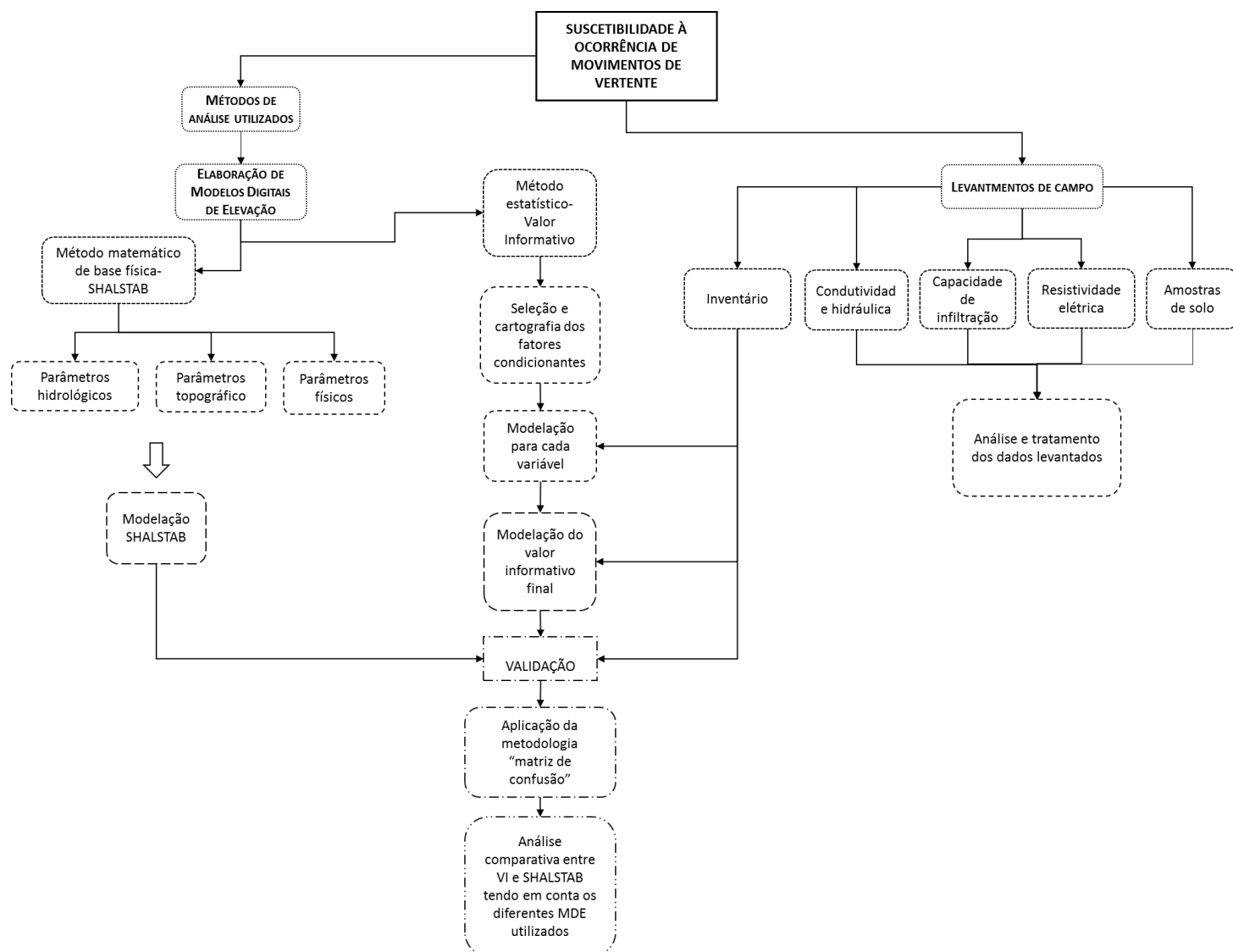


Figura 27- Metodologia de trabalho.

3.1.1 Inventário das ocorrências

Face ao objetivo da dissertação, nomeadamente a aplicação de dois modelos de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente (um matemático de base física e outro estatístico), foi imprescindível a realização do inventário dos processos de instabilidade na área de estudo (Quinta das Carvalhas). O inventário é essencial apenas na modelação estatística, mas é necessário no procedimento de validação de ambos os modelos preditivos.

O inventário (figura 28) foi feito com recurso ao levantamento sobre o terreno, considerando a inadequação dos métodos indiretos, dada a escala de detalhe do trabalho em causa ⁷.

É importante referir que embora a administração da quinta possua um registo de ocorrências, este engloba apenas as características necessárias à intervenção e renovação da vinha, não fazendo a distinção entre o tipo de processos, pelo que não se adequa ao objetivo deste trabalho.

Da mesma forma, não foi possível recorrer a outras fontes documentais (i.e. periódicos) nem a informação da proteção civil, uma vez que os processos de instabilidade da área de estudo não provocam danos em pessoas ou funcionalidades que impliquem resposta institucional.

Aquando da realização do inventário foram considerados como indicadores dos processos de instabilidade não só a presença evidente de deslizamentos ou cicatrizes de movimentos mais antigos, mas também muros caídos (nas áreas de armação de terreno tradicional, com patamares suportados por muros de pedra em seco), muros com irregularidades e muros reconstruídos associados a antigas quedas (figura 29). A presença de um deslizamento translacional de grandes dimensões não foi considerado para a modelação estatística, pelo fato de possuir diferentes características de instabilidade em relação aos restantes processos.

Na figura 30 é apresentada a ficha modelo utilizada para a realização do inventário. São consideradas questões básicas e fundamentais como a localização geográfica do ‘ponto’ de instabilidade, o tipo de processo, uso do solo e, nos casos de ocorrência na área de vinha, o sistema de armação de terreno. As características morfológicas da vertente, como a curvatura, a exposição e a inclinação, entre outras características, são fundamentais na tentativa de explicação da ocorrência do movimento. São ainda apontadas as causas prováveis da ocorrência, no caso de existirem indícios visíveis. O último campo, destina-se ao registo fotográfico.

⁷ Ver técnicas de realização do inventário- Capítulo 2- Métodos de Análise.

Após a conclusão do levantamento foram contabilizados 329 pontos de instabilidade (figura 28). Pelo facto de serem visualizadas várias ocorrências mas de tamanho reduzido, a sua representação cartográfica foi elaborada através de pontos ao invés de polígonos, como é usual nos trabalhos que visam a modelação da instabilidade geomorfológica.

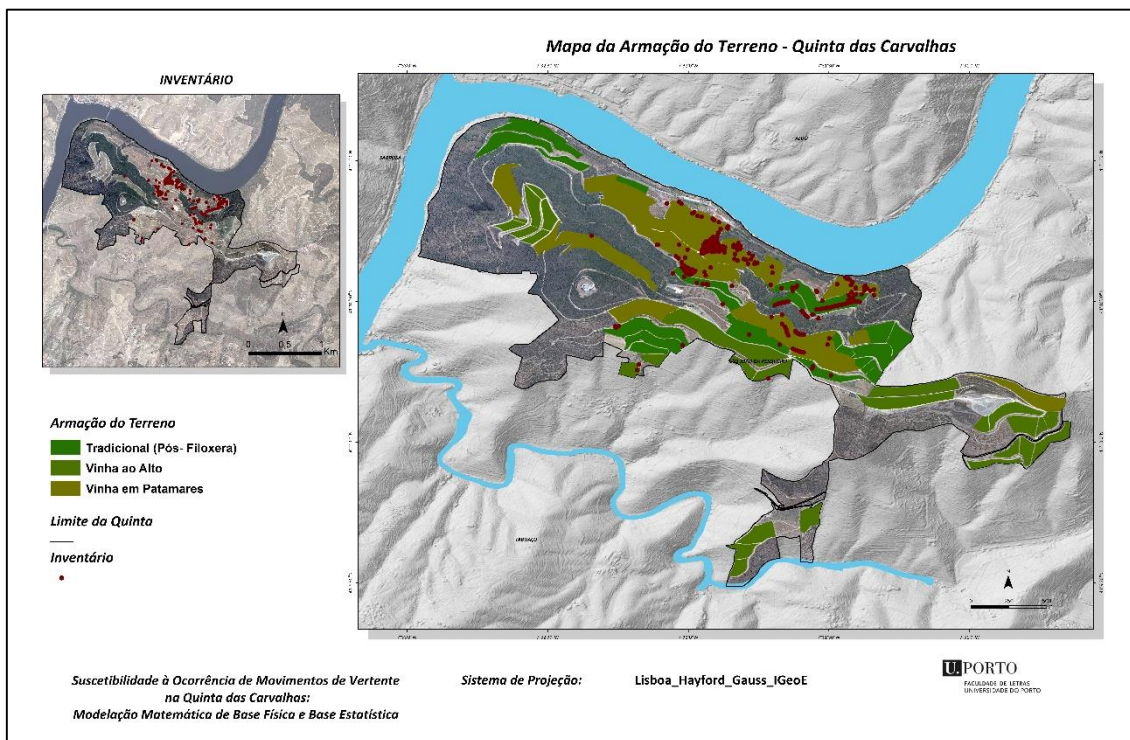


Figura 28- Tipo de armação do terreno e inventário realizado.

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.



Figura 29 - Exemplos de processos de instabilidade considerados para o inventário. A figura A, representa uma queda de muro associada a um deslizamento. B é uma área de deslizamentos translacionais. C muro reconstruído. D vista geral de uma área de instabilidade considerada no inventário.

Fonte: Própria

PROJECTO
MODRIS

Susceptibilidade a processos hidro-geomorfológicos no Norte de Portugal
Inventário de Movimento de Vertente

A- LOCALIZAÇÃO

1. Ficha nº **P1**
2. Data de levantamento- **30/10/13**
3. Mapa (1/25000): _____
4. Mapa grande escala (1/2000): _____
5. Outras observações de apoio à localização

Coordenadas:

29 T

622805.01 m E/4560041.80 m N

B- TIPO DE MOVIMENTO

6. Tipo de movimento
- 6.1. Desabamento ☐
- 6.2. Deslizamento/desab.er.lat. ☐
- 6.3. Balançamento ☐
- 6.4. Expansão lateral ☐
- 6.5. Escoada ☐
- 6.6. Deslizamento ☒
- 6.7. Movimento complexo ☐
- 6.8. Indeterminado ☐
- 4.1.1. Rotacional ☐
- 4.1.2. Translacional ☐

C- COBERTO VEGETAL E USO DO SOLO

7. Culturas
- 7.1. Vinha ☐
- 7.2. Oliveira ☒
- 7.3. Outros _____
12. Inculto ☐
- 12.1 Permanente ☐
- 12.2 Ocasional ☐
8. Floresta
- 8.1. Pinheiro ☐
- 8.2. Eucalipto ☐
- 8.3. Outros ☐
9. Arbustos ☐
10. Matagal ☐
11. Arbustos ☐
- 13 Observações: A montante a presença de área de oliveiras, o mesmo acontece a jusante após o caminho. Deslizamento antigo em talude com oliveiras

D- Tipo de Armação de Terreno	
14.1. Vinha ao alto	<input type="checkbox"/>
14.2. Vinha em patamar/talude	<input type="checkbox"/>
14.3. Vinha com muro de pedra em seco	<input type="checkbox"/>
14.3. Vinha sem qualquer tipo de armação específica	<input type="checkbox"/>
E- MORFOLOGIA DA VERTENTE	
14. Altitude máxima _____ m	
15. Exposição_S/N_____	
16. Distância topo/base da vertente _____m	
17. Inclinação da vertente _40__º	
18. Perfil vertical	20 Perfil horizontal
18.1. Concavo <input checked="" type="checkbox"/>	14.1. Concavo <input checked="" type="checkbox"/>
18.2. Convexo <input type="checkbox"/>	14.2. Convexo <input type="checkbox"/>
18.3. Retilíneo <input type="checkbox"/>	14.3. Retilíneo <input type="checkbox"/>
19. Talude	
19.1. Altura _____	
19.2. Largura _____	
F- CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO	
20. Movimento:	
20.1. Certo <input checked="" type="checkbox"/>	
20.2. Provável <input type="checkbox"/>	
G- CAUSAS PROVÁVEIS	
21. Litologia <input type="checkbox"/>	27 Outras causas: <input checked="" type="checkbox"/>
22. Estrutura	_____
22.1. Estratificação <input type="checkbox"/>	_____
22.2. Falhas <input type="checkbox"/>	_____
23. Permeabilidade <input type="checkbox"/>	_____
24. Obstrução de drenagem <input type="checkbox"/>	_____
25. Precipitação <input type="checkbox"/>	_____
26. Características da vertente	_____
26.1. Declive <input type="checkbox"/>	_____
26.2. Exposição <input type="checkbox"/>	_____
H- OUTRAS INFORMAÇÕES	
28 Informações adicionais:	_____
29 Fotografias números: Foto 349	

Figura 30-Ficha de campo utilizada na realização do inventário.

3.2 CARTOGRAFIA DOS FATORES CONDICIONANTES

Para a modelação de base estatística, utilizamos os seguintes fatores condicionantes: os declives, a orientação das vertentes, as áreas contributivas, o índice topográfico de humidade, o uso do solo e a curvatura das vertentes. Contudo, existem outros fatores que podem ser analisados e considerados neste tipo de modelos, como, por exemplo, a litologia. Mas pelo fato da área de estudo ser de grande escala, esta não apresenta variação espacial significativa. Considerou-se ainda, como critério de seleção dos fatores condicionantes, a necessidade de uniformizar os parâmetros dos dois tipos de modelos.

A cartografia destes fatores foi derivada de dois MDE's diferentes, que serão designados por MDE (A) e MDE (B), tendo em conta a metodologia de criação e desenvolvimento dos mesmos⁸: o MDE (A), com resolução espacial de 5m, foi desenvolvido a partir de fotografias aéreas com resolução espacial de 50cm; o MDE (B), com a mesma resolução, foi desenvolvido a partir de curvas de nível com 10m de equidistância, pontos cotados e hidrografia à escala 1/25000.

⁸ Sobre este assunto, consultar: Oliveira, A. S.; Bateira, C.; Soares, L.; Faria, A.; Fernandes, J.; Teixeira, M.; Hermenegildo, C. - MODRIS: Suscetibilidade a processos hidrogeomorfológicos no Norte de Portugal: modelação matemática de base física e de base estatística. Porto: Letras Departamento de Geografia Física 2014.

3.2.1 Declives

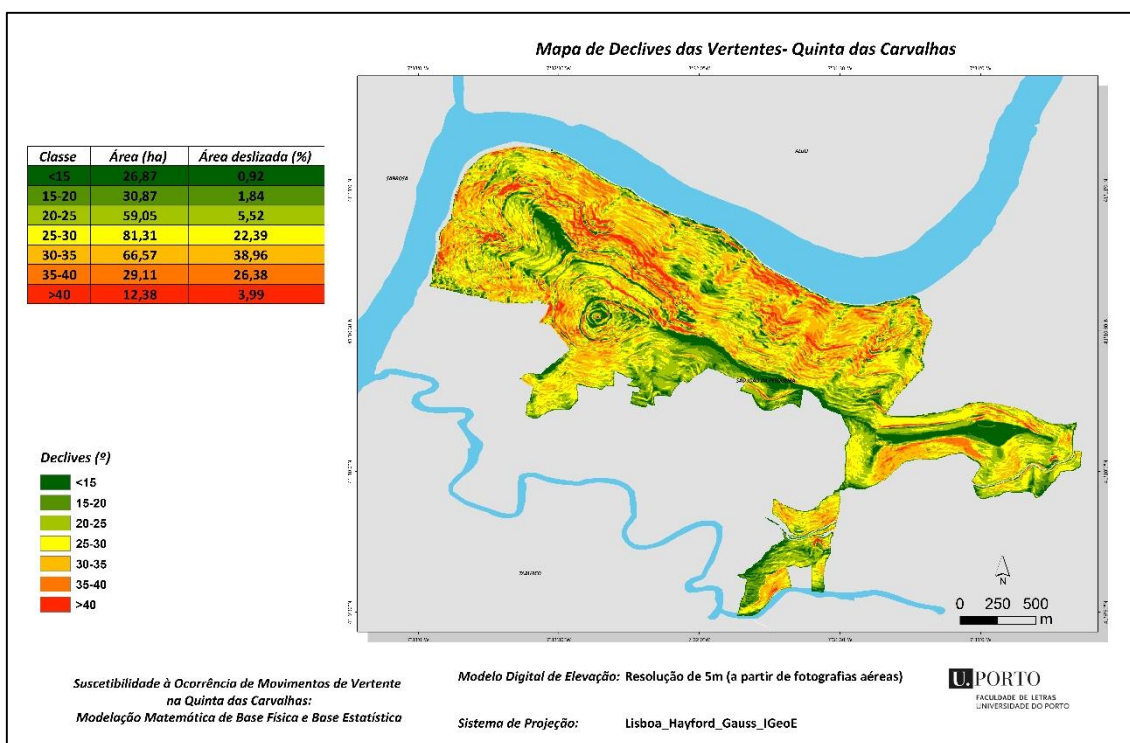


Figura 31- Declives da área de estudo- MDE (A).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

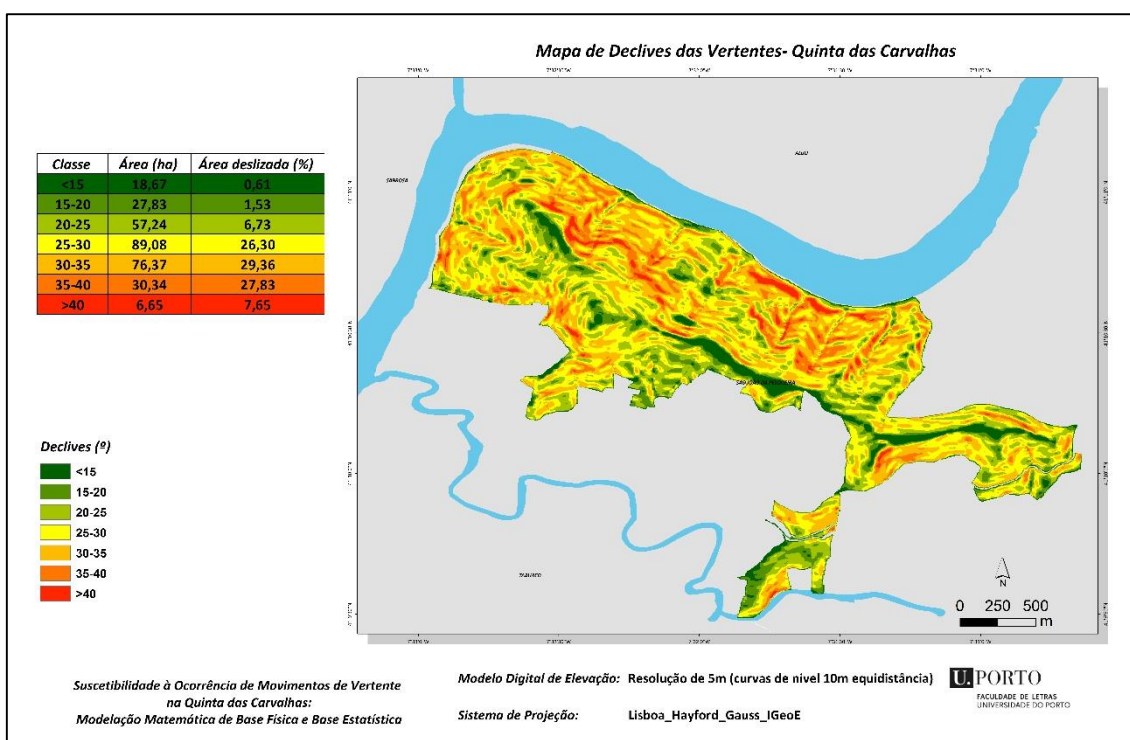


Figura 32- Declives da área de estudo- MDE (B).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

A variável “declive” exerce uma elevada influência sobre a ocorrência de movimentos de vertente, pelo efeito da gravidade (TEIXEIRA, 2012)⁹. O mapa de declives, elaborado com base do MDE (A), foi classificado em 7 classes: <15; 15-20; 20-25; 25-30; 30-35; 35-40 e >40° (figura 31). A classe 25-30° apresenta a área mais considerável, de 81ha, seguindo-se a classe 30-35° com 67ha. A classe de 40° abrange uma menor área, correspondente a 12ha.

Quanto ao mapa da figura 32, desenvolvido a partir do MDE (B) e classificado com as mesmas classes que o anterior, é a classe 25-30 ° que possui maior representatividade em termos de área: 89ha. Portanto, os dois MDE’s remetem para a mesma classe de declives dominantes, embora no mapa derivado do MDE (B) esta englobe maior área.

As áreas de menor declive (<15°), com uma área de 27ha e 19ha nos modelos (A) e (B), respetivamente, localizam-se sobretudo a uma maior altitude, associadas em muitos casos à presença de estradas de acesso na quinta e às áreas de interflúvio situadas a SW. As áreas de maior declive (>40°) e com uma área de 12ha e 7ha, encontram-se essencialmente em áreas de floresta/mato e olival.

Quanto aos movimentos de vertente, é na classe 30-35° que se concentram em maior percentagem, 39% (figura 31) e 29% (figura 32), seguindo-se as classes 35-40° com 26% e 28%, respetivamente em (A) e (B).

Em suma, apesar das áreas ocupadas por cada classe e as áreas deslizadas em percentagem serem ligeiramente diferentes, as classes com maior representatividade em termos de área remetem para as mesmas classes.

⁹ Ver capítulo 2, fatores condicionantes e desencadeantes dos movimentos de vertente.

3.2.2 Orientação das Vertentes

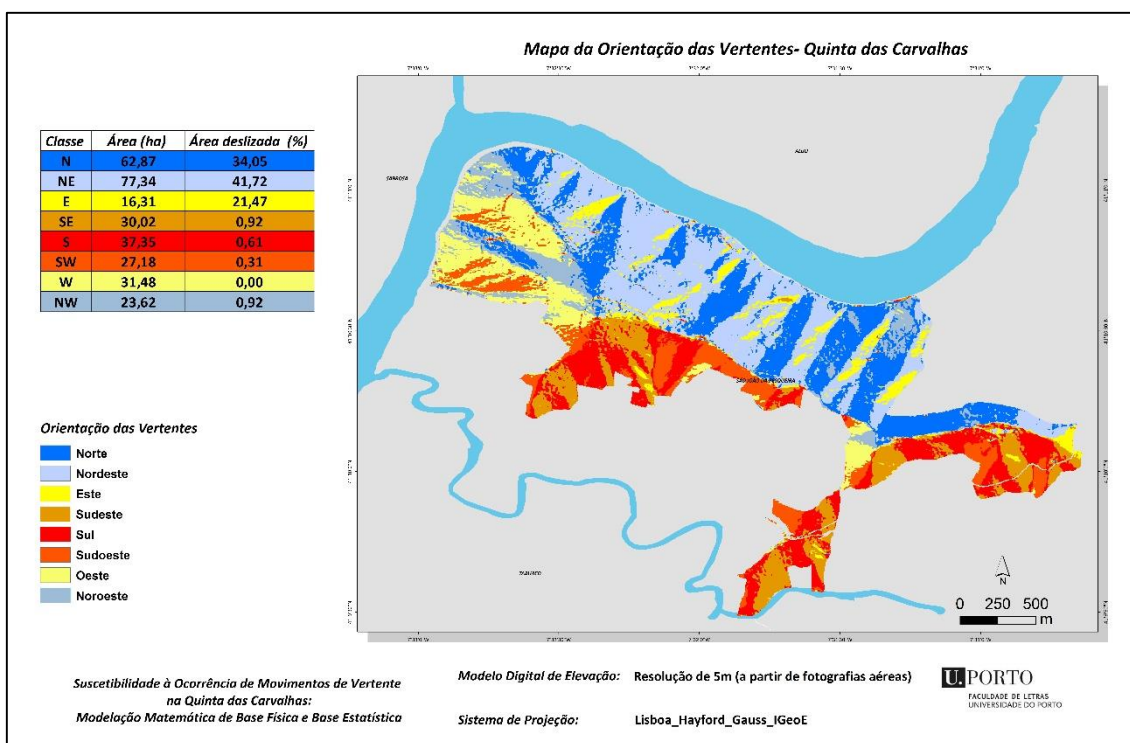


Figura 33- Mapa da exposição de vertentes da área de estudo- MDE (A).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

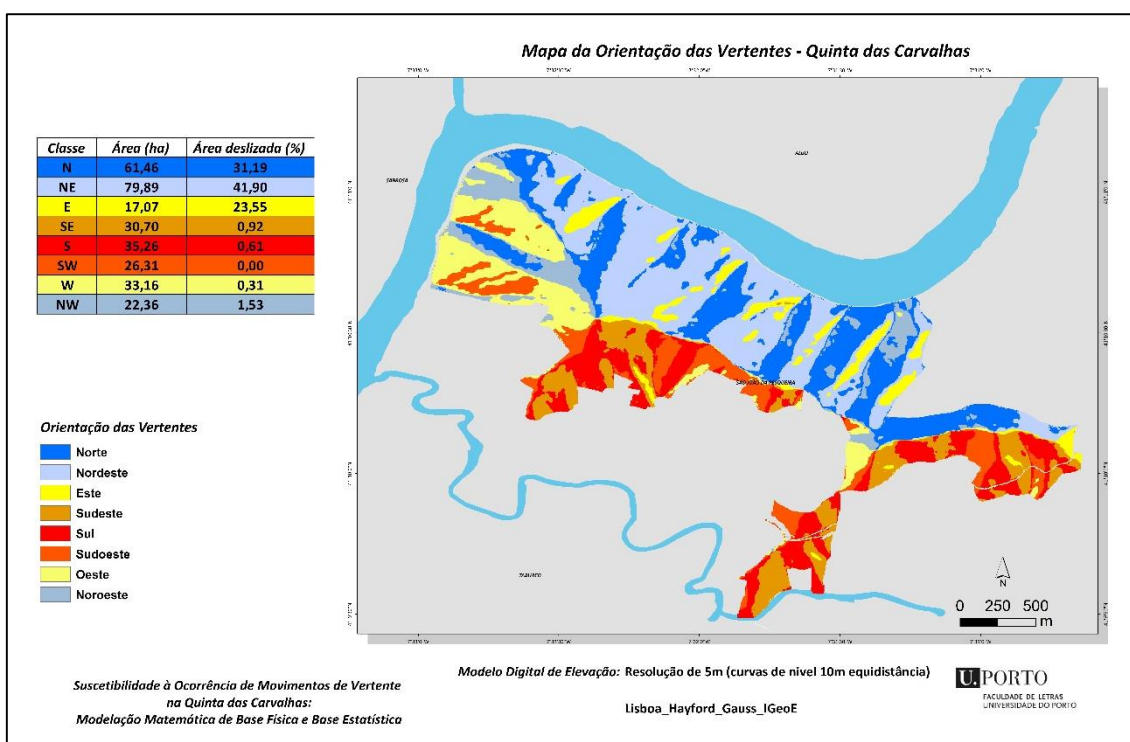


Figura 34- Mapa da exposição de vertentes da área de estudo- MDE (B).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

A orientação das vertentes desempenha igualmente um papel importante na instabilidade das mesmas, associada ao ciclo de humidade e consequentemente à vegetação e estrutura das rochas¹⁰.

Os mapas derivados dos dois MDE's foram reclassificados em octantes (figuras 33 e 34), sendo notória uma divisão clara entre vertentes soalheiras e umbrias. A orientação a Nordeste apresenta uma área de 77ha na figura 33 (MDE A) e aproximadamente 80ha na figura 34 (MDE B). Segue-se a orientação Norte com uma área de aproximadamente 63ha em (A) (figura 33) e de 61ha em (B) (figura 34), sendo a exposição a Este a que possui menor importância na quinta, com apenas 16ha e 17ha, respetivamente. Portanto, as classes mais e menos representativas em termos de área, remetem para as mesmas orientações em ambos os MDE's. A Quinta das Carvalhas, pela sua localização geográfica e características topográficas, apresenta predominantemente vertentes umbrias. É precisamente nas vertentes expostas a Norte que se verifica a maior ocorrência de movimentos de vertente.

Na instabilidade registada, a classe que apresenta maior percentagem de área deslizada remete para a orientação Nordeste, com 41.72% (figura 33) e 41.90% (figura 34) de área deslizada, seguindo-se as exposições a Norte 34% e 31% respetivamente) e a Este (21% e 24% respetivamente). As restantes exposições contêm processos de instabilidade muito pouco significativos ou até mesmo sem registos.

¹⁰ Ver capítulo 2- Fatores Condicionantes e Desencadeantes dos Movimentos de Vertente.

3.2.3 Áreas contributivas

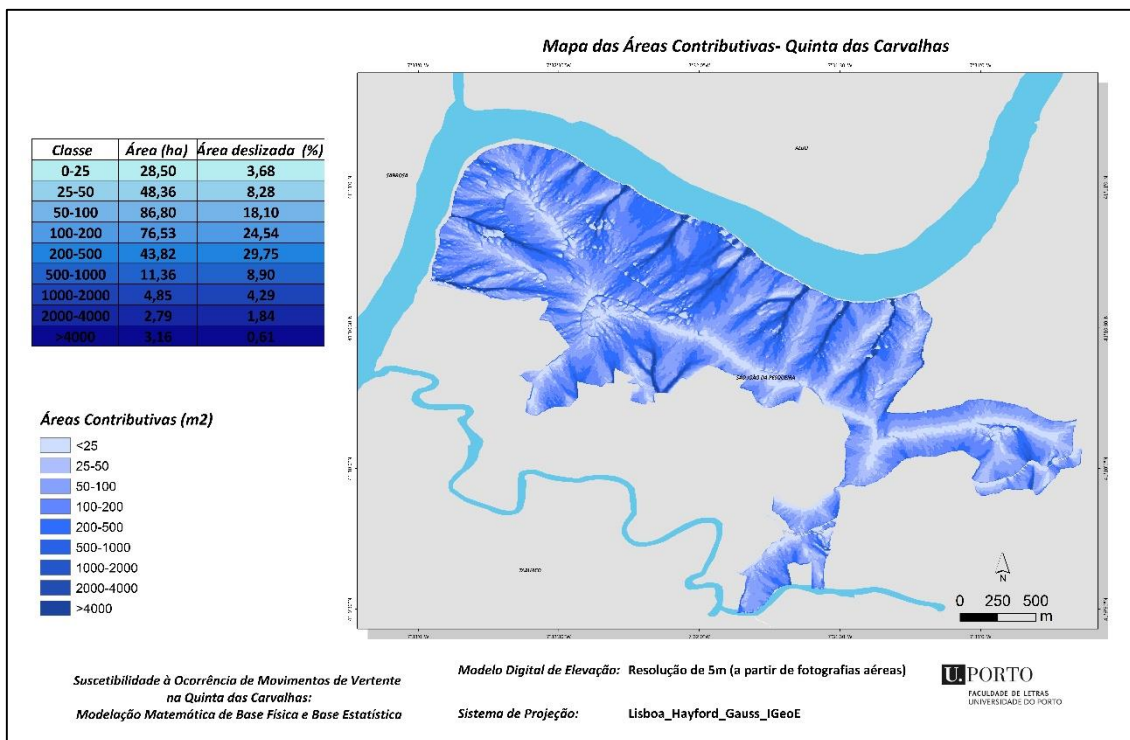


Figura 35- Áreas contributivas da área de estudo- MDE (A).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

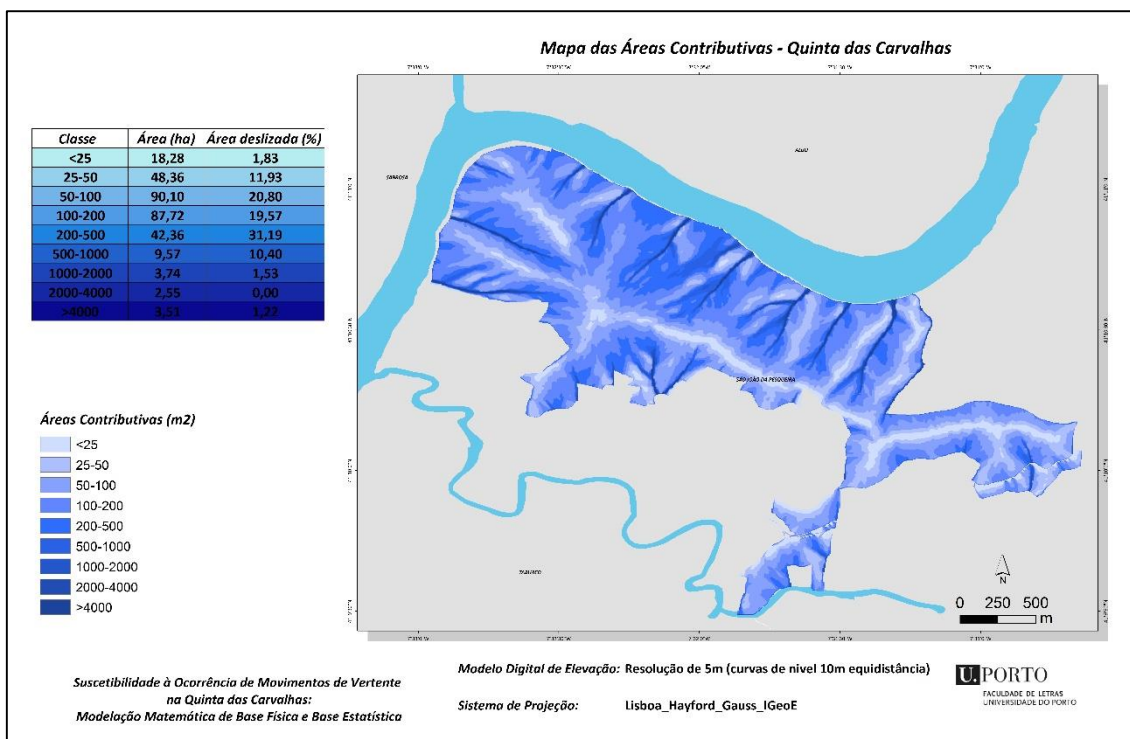


Figura 36- Áreas contributivas da área de estudo- MDE (B).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

As áreas contributivas apresentam um papel relevante não só para a modelação estatística mas também constituem um fator preponderante na modelação matemática¹¹. A área contributiva de uma célula, representa a área total drenada a montante e a sua própria contribuição. As áreas contributivas do modelo hidrológico do SHALSTAB utilizam a metodologia desenvolvida por QUINN [et al.] (1991), que utiliza o algoritmo de direção múltipla (MD8). Assenta na distribuição proporcional do fluxo entre as células, ou seja, a distribuição é feita tendo em conta todos os pixéis vizinhos de menor declive (QUINN [et al.], 1991, TARBOTON, 1997).

Na sua representação cartográfica, foram definidas 9 classes (figuras 35 e 36). A classe 50-100m² detém uma maior área, com 87ha em (A) (figura 35) e 90ha em (B) (figura 36). Segue-se a classe 100-200m², com 77ha e 88ha respetivamente, sendo a classe com menor representatividade a de 2000-4000m² com aproximadamente 2.79ha e 2.55ha. Portanto, as classes com maior e menor representatividade em termos de área são as mesmas, apesar de derivarem dos diferentes MDE's.

Em termos de instabilidade, a classe 200-500m² apresenta 30% (figura 35) e 31 % (figura 36) de área deslizada em relação ao total dos deslizamentos ocorridos, seguindo-se a classe 100-200m² com 25% de área deslizada (MDE A). Por outro lado, nas áreas contributivas do MDE (B) a segunda classe com maior percentagem de movimentos ocorridos é a classe 50-100m² com aproximadamente 21%. A classe com menor representatividade remete para > 4000m² com 0.61% (figura 35). Na figura 36 a classe menos representativa é a classe 2000-4000m² sem ocorrências de movimentos de vertente. Neste fator condicionante a maior e a menor percentagem de movimentos ocorridos encontram-se em diferentes classes tendo em conta o MDE utilizado.

¹¹ O seu importante papel pode ser verificado no Capítulo 2- Fatores Condicionantes e Desencadeantes dos Movimentos de Vertente e no Modelo Matemático SHALSTAB- Modelo Hidrológico.

3.2.4 Índice topográfico de humidade (TWI)

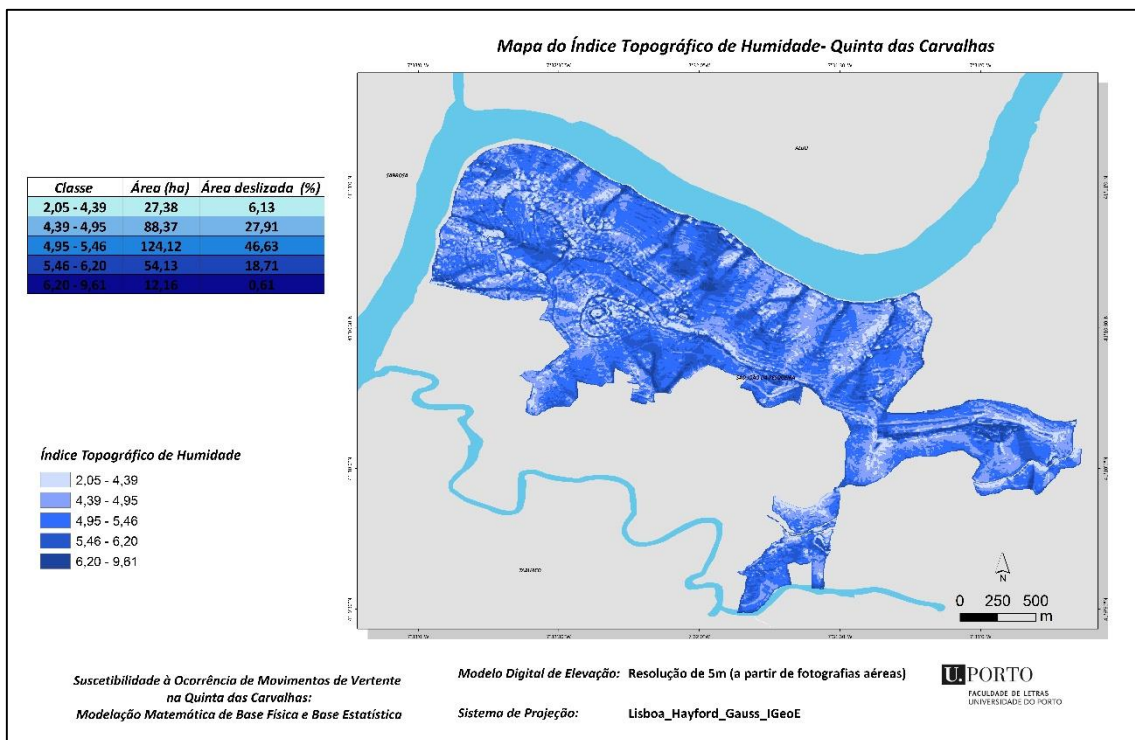


Figura 37- Índice topográfico de humidade da área de estudo- MDE (A).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

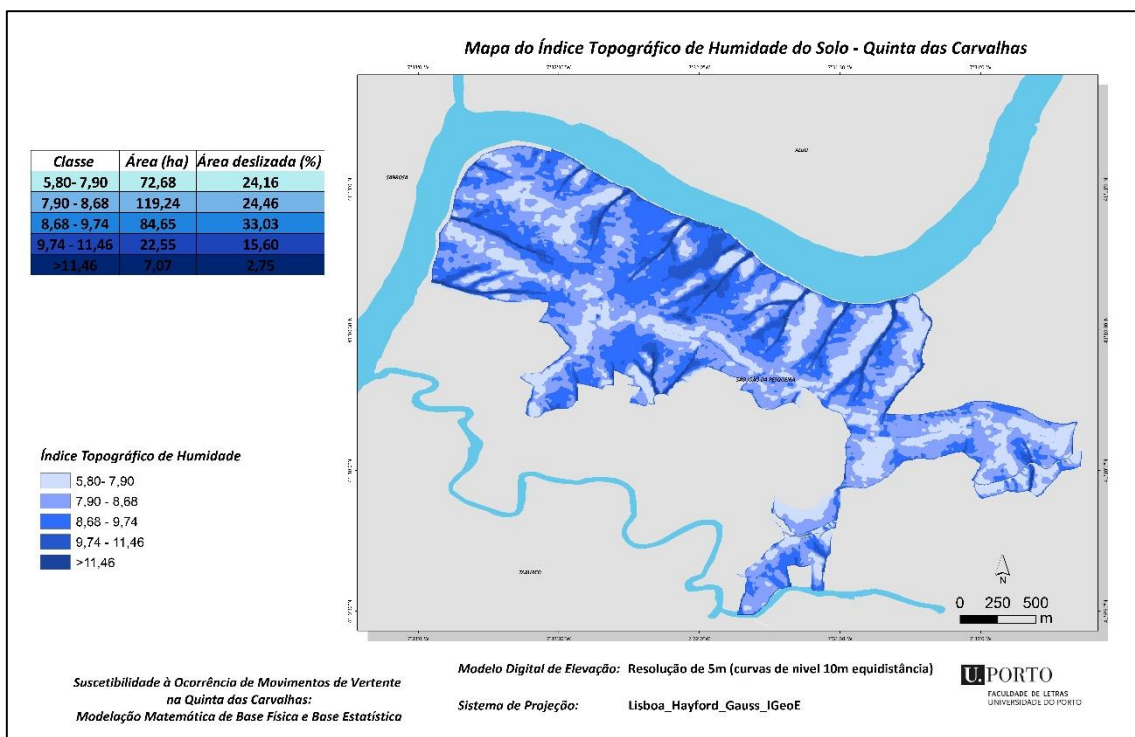


Figura 38- Índice topográfico de humidade da área de estudo- MDE (B).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

Pelo importante papel que assume, o TWI foi também incorporado na modelação estatística. O seu cálculo baseia-se na metodologia de BEVEN and KIRKBY (1979), que define as células com maior ou menor humidade tendo em conta a área de contribuição (α) e o declive (β) da bacia hidrográfica. Baseia-se no pressuposto que o efeito da topografia é capaz de explicar o escoamento, de localizar as zonas de saturação da superfície e a distribuição espacial da água no solo (BEVEN and KIRKBY, 1979, O'LOUGHLIN, 1986), de acordo com a seguinte equação:

Equação 30

$$IDW = \ln(\alpha / \tan(\beta))$$

O resultado obtido foi reclassificado em 5 classes, com o critério das quebras naturais (figura 37 e 38).

No caso do MDE (A), a classe 4,95 - 5,46¹² representa uma área de 124ha, enquanto a de 6,20 - 9,61 abrange apenas 12ha. São as classes intermédias que apresentam maior importância em termos de área em relação ao total da quinta (figura 37).

Para o MDE (B), a classe com maior representatividade em termos de área é a classe 7.90 - 8.68, com 119ha, seguindo-se a de 8.68 - 9.74 com aproximadamente 85ha (figura 38). As comparações tornam-se neste caso dificultadas pelo facto dos resultados obtidos serem bastante distintos, evidenciando as diferenças entre os MDE's utilizados.

Quanto à instabilidade, é de salientar que a classe com mais ocorrências em (A) é a classe 4.95 - 5.46, com 47% de área deslizada, enquanto a classe 6.20 - 9.61 apenas conta com 1% de área deslizada.

No contexto do MDE (B), o maior número de processos (33%) centra-se na classe 8.68-9.74. Apesar dos resultados serem diferentes entre os MDE's, são apresentadas 5 classes, e em ambos os casos é na 3ª classe que há maior ocorrência de movimentos de vertente. A classe com menor representatividade, em termos de processos de instabilidade ocorridos, remete para a classe >11.46 com apenas 3% e 1% nas figura 37 e 38, respetivamente.

¹² As classes relativas ao IDW são adimensionais.

3.2.5 Uso do solo

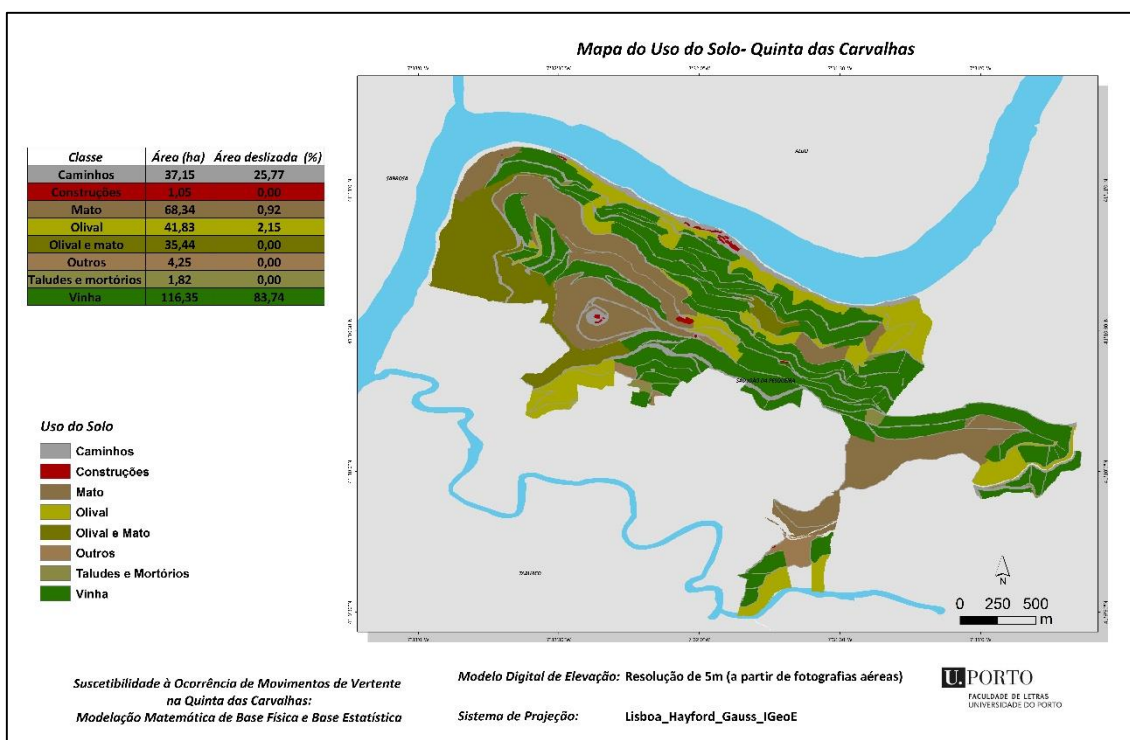


Figura 39- Uso o solo da área de estudo.

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

O uso do solo¹³ foi incorporado na modelação estatística, dada a sua variabilidade espacial. A vinha assume grande importância, abrangendo a maior percentagem da área da quinta (116ha), mas o olival (42ha) e mato (68ha) também detêm uma área considerável (figura 39). O edificado ocupa apenas 1ha.

Relativamente aos movimentos de vertente, como seria de esperar, é na vinha que se concentram os principais movimentos de vertente (84%), dada a incidência do próprio inventário nestas áreas. Ocasionalmente ocorrem movimentos nos taludes dos caminhos, tendo sido contabilizada 25% de área deslizada. O mesmo acontece nos taludes com presença do olival, mas apenas conta com uma área de 2%.

¹³ Os diferentes usos do solo da Quinta das Carvalhas foram desenhados recorrendo à ferramenta *Trace* do *Editor* do *ArcGis*. A obtenção da informação dos usos do solo não necessitou da utilização do MDE, pelo que, para a modelação da suscetibilidade, o mapa de usos do solo é igual nos dois modelos. Por esse motivo, se apresenta um só mapa.

3.2.6 Curvatura das vertentes

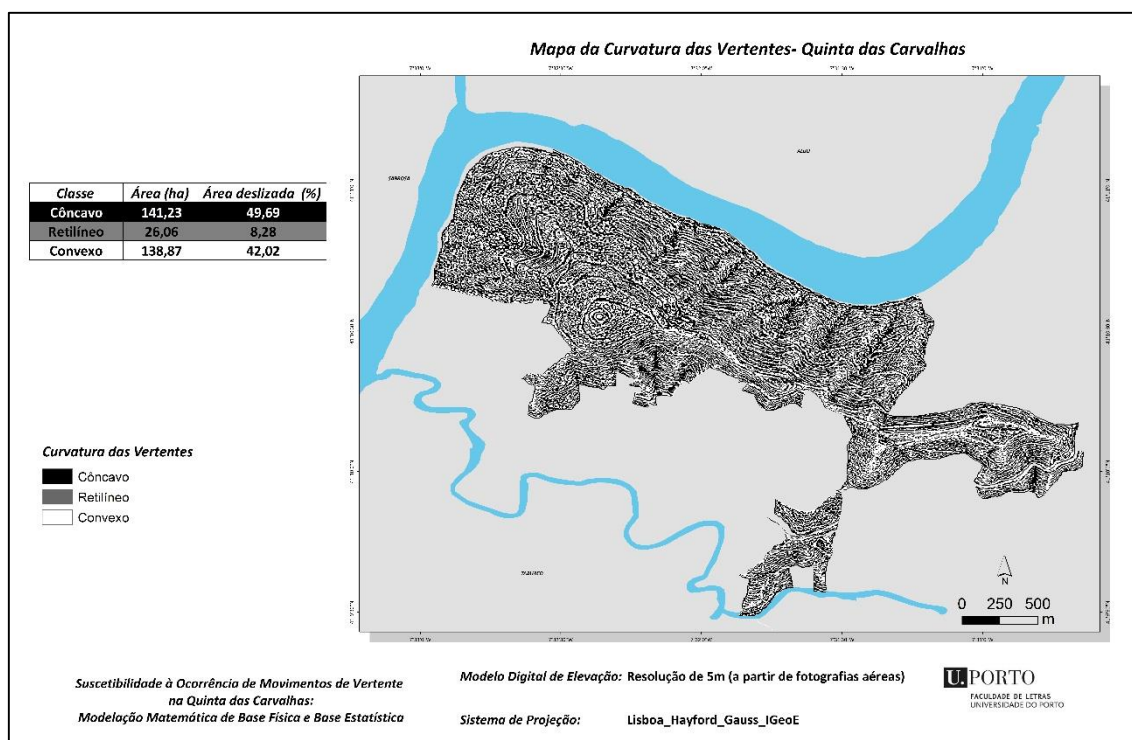


Figura 40- Curvatura das vertentes da área de estudo- MDE (A).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

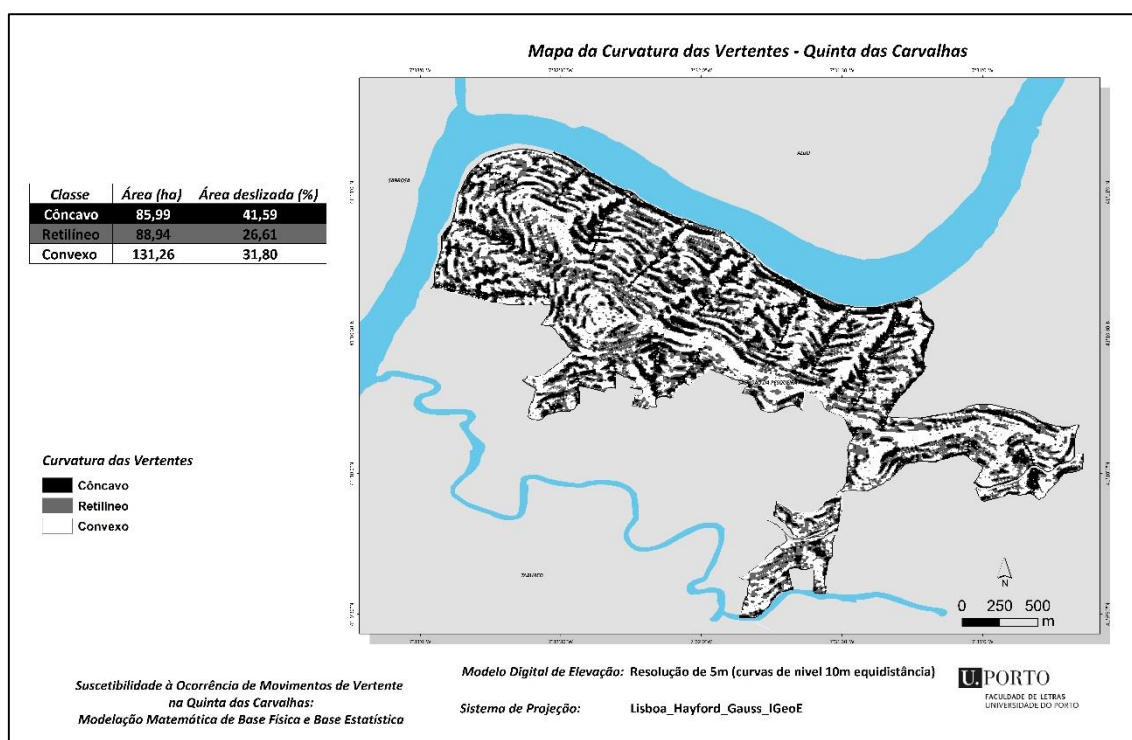


Figura 41- Curvatura das vertentes- MDE (B).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

Outro aspeto importante a ser realçado, prende-se com a curvatura das vertentes. A forma da vertente é um fator condicionante importante no estudo da hidrologia das mesmas¹⁴ e, conseqüentemente, na instabilidade (SELBY, 1993a).

Os mapas das figuras 40 e 41 mostram uma classificação que subdivide as vertentes em côncavas, retilíneas e convexas. Da leitura do mapa da figura 40, é possível evidenciar que o traçado côncavo é mais representativo, apresentando uma área de 141ha, comparativamente com 26ha do traçado retilíneo que se mostra a classe menos representativa. O traçado convexo apresenta uma área de 139ha relativamente ao total da quinta.

A figura 41 representa a curvatura obtida através do MDE (B). Neste caso, é o traçado convexo o que detém maior representatividade em termos de área, com 131ha, enquanto o côncavo é o que apresenta menor área (86ha) e o retilíneo abrange 89ha. Ou seja, a curvatura das vertentes assume resultados diferentes tendo em conta o MDE utilizado.

Quanto à instabilidade, é de referir que a classe com maior percentagem de área deslizada remete para o traçado côncavo, com 50% (figura 40) e 42% (figura 41). A classe mais estável é o traçado retilíneo com aproximadamente 8% (MDE A) e 27% de área deslizada (MDE B).

3.3 PARÂMETROS FÍSICOS

A determinação dos parâmetros físicos como a coesão do solo, o ângulo de atrito interno, o peso específico do solo e espessura do solo, são essenciais à aplicação do modelo matemático de base física (SHALSTAB). Estes parâmetros foram levantados sobre o terreno, exceto a coesão, que foi calculada por retroanálise.

3.3.1 Coesão

A coesão reflete a força de resistência do solo ao cisalhamento. Em solos não saturados quanto menor o diâmetro das partículas maior a capilaridade do solo, e, conseqüentemente, maior a sua coesão. Em solos saturados não há tensão superficial, pelo que a força disponível para a coesão está muito limitada.

A coesão do solo deriva principalmente do critério de rotura de Mohr- Coulomb. É um dos componentes que descreve a resistência do solo ao cisalhamento e refere-se à parte sem fricção de resistência ao cisalhamento, que é independente da tensão normal (GEOTECHDATA,

¹⁴ Ver capítulo 2- Fatores Condicionantes e Desencadeantes dos Movimentos de Vertente.

2011a, SELBY, 1993a). As forças de coesão referem-se a ligações electrostáticas, à consolidação dos materiais e da água.

A coesão pode ser dividida em coesão aparente e coesão efetiva. A coesão aparente refere-se às pressões capilares da água no solo. *Depende do tamanho das partículas do solo e rocha, da sua forma e dos minerais constituintes, da quantidade de água presente e do arranjo das partículas* (SELBY, 1993a, p. 54). A coesão efetiva diz respeito às ligações químicas, forças electrostáticas e forças magnéticas (SELBY, 1993a).

Como referimos, para a modelação matemática o valor da coesão foi determinado por retroanálise, considerando os pressupostos seguintes. A estabilidade da vertente é conseguida quando o Fator de Segurança (FS) é igual ou superior a 1 (equação 6). Desta forma, conhecendo os parâmetros que constituem o FS, nomeadamente o ângulo de atrito interno (ϕ), a altura do solo (h), a coluna de água acima do plano de rotura (d_w), o peso volumétrico do solo natural (γ), o peso volumétrico do solo submerso (γ_{sub}), o peso volumétrico do solo saturado (γ_{sat}) e o declive (β) é determinada a coesão. Para a formação litológica de Bateiras, apresentando a vertente um declive (β) de 40°, um peso volumétrico do solo saturado (γ_{sat}) de 21.957, um peso volumétrico do solo submerso (γ_{sub}) de 12.147, um peso volumétrico do solo natural (γ) de 16.7 e a coluna de água acima do plano de rotura (d_w) de 0.5 e o ângulo de atrito interno (ϕ) de 40°, resulta num FS de 0.74. Desta forma a coesão do solo é de 2500 N/m², perfazendo um FS igual a 1. Para a modelação matemática de base física foram utilizadas os seguintes valores de coesão: 2500, 2600 e 2700 N/m².

3.3.2 Peso específico do solo

O peso específico do solo (ρ_s), foi determinado a partir da recolha de amostras em tubos de PVC. Em laboratório foram pesadas as amostras juntamente com o tubo utilizado. Seguidamente as amostras foram secas e pesadas novamente. O valor do solo húmido foi subtraído pelo seco. O resultado obtido foi posteriormente dividido pelo volume do tubo. O resultado refere-se ao peso específico do solo. No nosso caso de estudo o peso específico do solo, tendo em conta a litologia e as amostras de solo levantadas, é de 16.7 kN/m³. Tendo sido esse o valor utilizado para a modelação matemática de base física.

3.3.3 Ângulo de atrito interno

O ângulo de atrito do solo refere-se ao ângulo de inclinação em relação ao eixo horizontal da linha de resistência ao cisalhamento de Mohr- Coulomb (GEOTECHDATA, 2011b). Descreve a resistência de atrito ao corte do solo, juntamente com a tensão normal efetiva.

O ângulo de atrito possui contribuições de diversas fontes, nomeadamente resistência ao deslizamento interpartículas, correspondendo a metade da resistência e em grande parte da força residual dos solos. O valor do ângulo de atrito diminui com o aumento da plasticidade e da quantidade de água (SELBY, 1993a). O volume de vazios e o tamanho das partículas influencia igualmente o ângulo de atrito do solo (SELBY, 1993a).

Este parâmetro foi determinado no terreno, no plano de rotura das cicatrizes. Tendo em conta o levantamento efetuado, para a modelação matemática foi utilizada um ϕ de 40°.

3.3.4 Espessura do solo

Este parâmetro foi também determinado no terreno (no local das roturas), variando entre 1 e 2 metros (figura 42), valores que foram utilizados na modelação matemática de base física.

É importante salientar que a tipologia de solo da Quinta das Carvalhas corresponde a antrossolos (WRB, 2006). São solos remexidos pela utilização de maquinaria no cultivo da vinha. Apresentam fortes alterações fruto da intensa ação humana.



Figura 42- Exemplo de cicatriz de um deslizamento na Quinta das Carvalhas.

3.3.5 Textura do solo

A definição de solo não é unânime na comunidade científica associado às diferentes disciplinas que o estudam (ARNOLD, 2012, p. 4).

De acordo com a classificação de *Soil Taxonomy*, o solo *é distinguido como um corpo natural constituído por sólidos (minerais e orgânicos) líquidos e gases. É constituído por um ou mais horizontes, que se vão desenvolvendo e diferenciando do material parental através de adições, perdas, transferências e transformações de energia e matéria. Possui ainda a capacidade de suportar as plantas num ambiente natural* (ARNOLD, 2012, p. 8). De entre as várias propriedades físicas do solo, como a estrutura, a consistência, a densidade, a temperatura e a cor, a textura é provavelmente a que exerce mais influência na avaliação da instabilidade de vertentes (FOTH, 1990). O estudo da granulometria das amostras recolhidas na área de estudo permitem compreender a capacidade de infiltração, a condutividade hidráulica e a resistividade elétrica obtidas em campo. A inter-relação entre estes parâmetros permitem-nos conhecer o terreno e as possíveis relações com os processos de instabilidade.

A porosidade, a permeabilidade, a coesão, a plasticidade, a adesividade e a infiltração, são propriedades físicas que se relacionam e influenciam a textura do solo (FOTH, 1990).

Quanto à coesão, o cascalho não apresenta coesão. Contrariamente a areia, apresenta coesão aquando da saturação do solo, pela aderência das partículas. O silte e a argila apresentam coesão mesmo em estado não saturado (DIAS, 2004).

O solo é constituído por minerais e partículas orgânicas de vários tamanhos. Sendo que essas partículas estão dispostas numa matriz possuindo cerca de 50% de poros que podem ser preenchidos por ar e água (FOTH, 1990). Os poros variam em tamanho, podendo variar entre macroporos¹⁵, mesoporos¹⁶, microporos¹⁷, ultramicroporos¹⁸ e criptóporos¹⁹ (AMERICA). Por exemplo, uma baixa porosidade pode ser relacionada com ausência de estrutura e consequentemente com ausência de espaços vazios (FOTH, 1990). Texturas de solo finas contém principalmente microporos sendo por isso capazes de reter grandes quantidades de água. Em contrapartida possui fraca capacidade de transmitir água rapidamente (FOTH, 1990). Espaço poroso não significa automaticamente facilidade de circulação de água e permeabilidade. Por exemplo, solos argilosos possuem grandes quantidades de espaço poroso, no entanto, é pouco permeável, pois os poros são de tamanho muito reduzido o que dificulta a circulação de água e

¹⁵ Os macroporos variam entre 75 e >5000 µm. America, Soil Science Society of - Glossary of Soil Science Terms. Disponível em WWW: <<https://www.soils.org/publications/soils-glossary>>.

¹⁶ Os mesoporos variam entre 30 e 75 µm. Ibid.

¹⁷ A dimensão dos microporos variam entre 5 e 30 µm. Ibid.

¹⁸ Quanto à dimensão dos ultramicroporos varia entre 0.1 e 5 µm ibid.

¹⁹ A classe limite dos criptóporos é de <0.1 µm ibid.

ar (SCHAETZL and ANDERSON, 2005). De uma forma sintetizada, a porosidade é a fração de volume de solo ocupado por poros. Existem algumas formas de cálculo da porosidade, nomeadamente a percentagem de espaços de poros²⁰, ou a proporção de vazios²¹.

Quanto à permeabilidade, é influenciada pelo tamanho dos poros e pela interconectividade entre eles (SCHAETZL and ANDERSON, 2005). Os solos permeáveis permitem o intercâmbio e o movimento da solução do solo através da conexão entre os poros (SCHAETZL and ANDERSON, 2005). A permeabilidade é ainda afetada pela saturação ou não do solo (SCHAETZL and ANDERSON, 2005).

A textura do solo avalia a proporção relativa de areia, silte e argila de um solo tendo em conta propriedades físicas acima descritas (FOTH, 1990).

A classificação textural é representada em diagramas triangulares, onde cada lado representa uma classe textural de 0 a 100%. As perpendiculares do triângulo são divididas em 100 partes, pelo que cada parte corresponde a 1% da classe textural (DIAS, 2004).

FOLK (1954) apresenta um diagrama triangular para os sedimentos grosseiros (figura 43), onde são representados proporcionalmente as percentagens de cascalho (>2mm), areia (2mm a 63 μ) e lodo (<63 μ) (in DIAS, 2004). A percentagem de cascalho apresenta a fronteira de 80%, 30% e 5%. Quanto à razão areia/lodo as fronteiras remetem para 9:1, 1:1 e 1:9 (DIAS, 2004). Esta classificação é composta por 15 termos, em que:

- C- cascalho,
- Ca- cascalho arenoso,
- Cal- cascalho areno-lodoso,
- Cl- cascalho lodoso,
- L- lodo,
- Lc- lodo cascalhento,
- L(c)- lodo ligeiramente cascalhento,
- Ac- areia cascalhenta,
- A(c)- areia ligeiramente cascalhenta.

²⁰ Porosidade *100.

²¹ Razão entre o volume de poros ou vazios pelo volume de partículas sólidas.

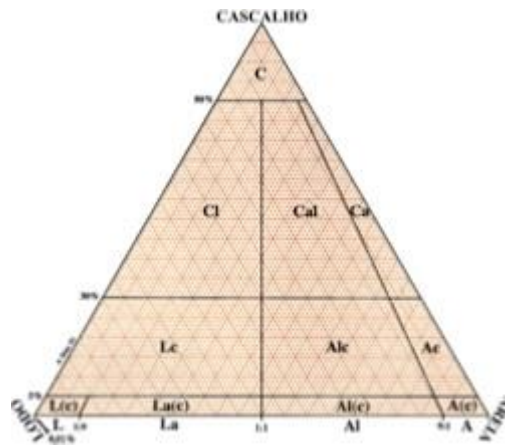


Figura 43- Diagrama triangular de Folk para a classificação dos sedimentos grosseiros. Extraído de DIAS (2004)

Foram coletadas amostras de solo (figura 44) em sectores próximos dos locais onde foram desenvolvidos ensaios no terreno, nomeadamente de condutividade hidráulica, capacidade de infiltração e resistividade elétrica.

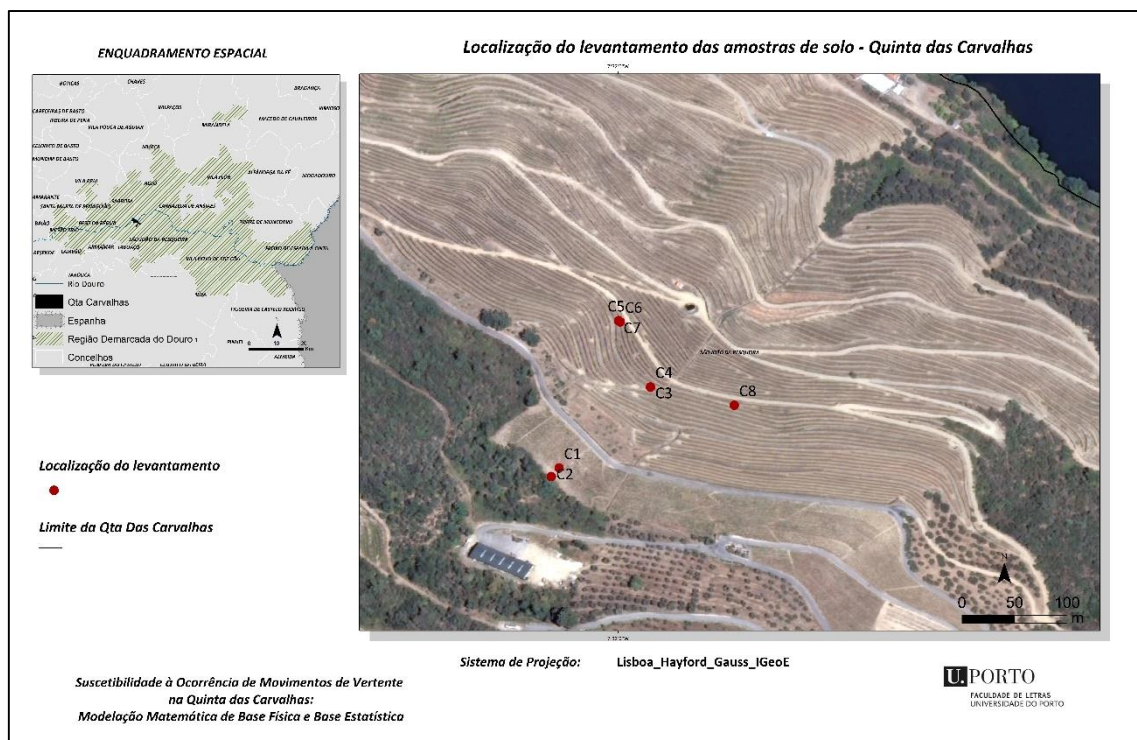


Figura 44- Localização das amostras de solo levantada- Quinta das Carvalhas.

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

Foram recolhidas 8 amostras do solo. O ponto C3 apenas se distingue de C4 pela profundidade da amostra recolhida. O ponto C4 remete para a 2ª camada do solo. O mesmo

acontece com C5 e C7, que refletem localizações iguais, mas com profundidades de solo diferentes.

Para a análise granulométrica das amostras levantadas, utilizou-se a estufa e mufla com o objetivo de retirar a humidade do solo e proceder à queima da matéria orgânica, respetivamente. As amostras foram divididas em duas partes, uma para apurar a percentagem de finos (por decantação) e a outra para as granulometrias de dimensão superior (peneiramento). A classificação textural adotada foi a classificação de Folk (figura 45), verificando-se que todas as amostras de solo recolhidas se inserem no domínio do “cascalho lodoso” e “lodo cascalhento”.

Com efeito, os ensaios granulométricos evidenciaram uma variação de finos (silte e argila) entre os 45 e os 69%, a percentagem de areia entre 7.40 a 16.40% e por fim o cascalho varia entre 25.45 e 39.60%. Os pontos C2 e C8 representam a classe textural cascalho lodoso. Localizado a montante de um deslizamento ocorrido, C2 apresenta 40% de cascalho, 12% de areia e 48% de finos. A amostra C8, que se localiza na vertente convexa com exposição a Norte apresenta 39% de cascalho, 16% de areia e 45% de finos. As restantes amostras de solo apresentam percentagens de finos ainda superiores que lhe conferem a terminologia de lodo cascalhento.

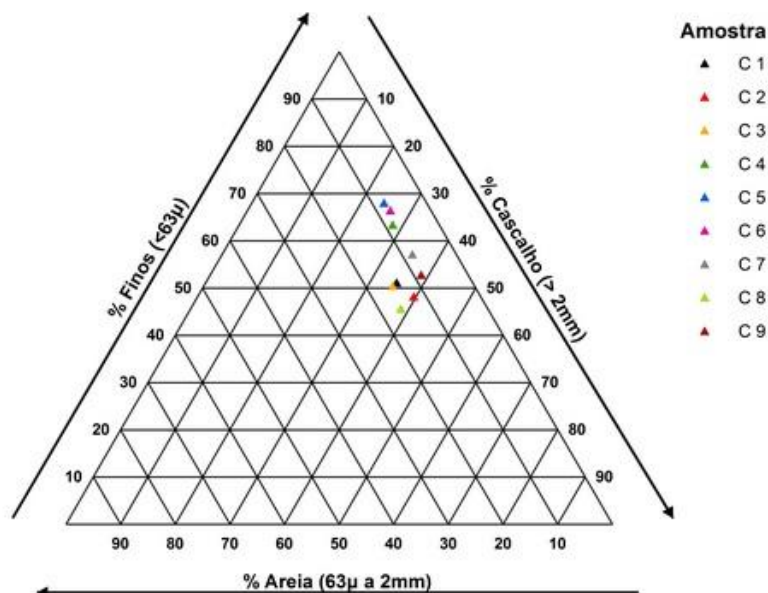


Figura 45- Diagrama triangular da granulometria das amostras de solo recolhidas na Quinta das Carvalhas.

3.3.6 Resistividade elétrica

O conceito de resistividade elétrica passa pela compreensão de outros conceitos, como por exemplo da resistência elétrica. Desta forma, entende-se por resistência elétrica (R) o *impedimento por parte dos portadores de carga, que estão sujeitos à ação de um campo elétrico na passagem de um ponto para outro num determinado corpo. Essa passagem do campo elétrico é dependente das dimensões e do tipo de material* (AQUINO, 2010, p. 5). A resistência do material (equação 31) é fornecida pela expressão matemática da lei de Ohm, aplicada em materiais isotrópicos.

A corrente elétrica (i) no interior do material varia linearmente com a tensão aplicada (V), sendo a resistência elétrica (R), a constante de proporcionalidade entre essas duas grandezas. O material analisado é um condutor (ou resistor) ôhmico, caso a equação seja verificada (AQUINO, 2010).

Equação 31

$$R = \frac{V}{i}$$

Em que:

R- é a resistência elétrica (ohms)

V- é a diferença de potencial (volts)

i - é a corrente elétrica (ampere)

A resistividade elétrica (ρ) refere-se de igual modo a um impedimento por parte dos portadores de carga, no entanto é uma propriedade intrínseca da matéria independente das dimensões do corpo. Portanto, a resistividade elétrica assume-se como uma característica ou propriedade do material (AQUINO, 2010, GIROTTO and SANTOS, 2002), sendo o resultado da sobreposição de diferentes fenómenos de condução elétrica (PACHECO, 2004). Depende, assim, de características do meio - como a condutividade do fluido intersticial, da porosidade, da irregularidade dos canalículos, da superfície específica e da capacidade de troca iônica e mineralogia das partículas sólidas - assim como de propriedades da matéria como o índice de refração, do calor específico, da densidade, da dureza, da elasticidade, da viscosidade, da temperatura de fusão, da temperatura de transição vítrea, etc (GIROTTO and SANTOS, 2002).

A resistividade elétrica é calculada a partir do diferencial de potencial (baixa frequência e contínua) e remete para a capacidade de limitar a transferência da corrente elétrica (BESSON [et al.], 2004). A relação entre resistência e resistividade elétrica de um material é expressa pela equação 32:

Equação 32

$$R = p \cdot \frac{l}{A}$$

Em que:

R- é a resistência elétrica (ohms);

l- é o comprimento do sólido (m);

A- é a área da seção transversal do sólido (m²);

p- é a resistividade elétrica (ohms.m).

A relação acima descrita não é generalizada. É válida para materiais uniformes e isotrópicos com secções transversais uniformes (GIROTTI and SANTOS, 2002).

A corrente elétrica é conduzida por condutores metálicos²². A condução elétrica em solos e rochas pode ser conduzida por fenómenos distintos. São destacados a condução eletrónica²³, a condução eletrolítica²⁴ e a condução dielétrica²⁵(MIRANDA NETO, 2002). Das correntes acima referidas, a eletrolítica assume grande importância em meio poroso como é o caso do solo, pelo fato de haver uma solução intersticial que facilita a condução elétrica.

A porosidade e o grau de saturação do solo assumem bastante importância na condução eletrolítica, pelo fato de haver maior possibilidade de espaços conectados preenchidos por solução intersticial. A corrente eletrónica/ôhmica assume alguma importância aquando da presença de grãos minerais que se evidenciam bons condutores (MIRANDA NETO, 2002) De acordo com WEEMEES (1990), este tipo de condução é mais habitual nas argilas.

A resistividade elétrica total do solo é influenciada por diversos fatores, pelo facto do solo ser um sistema multifásico (WEEMEES, 1990). É por isso influenciada pelo grau de saturação do solo, pois quanto menor o espaço disponível para a condução da corrente elétrica maior será a sua resistividade (AQUINO, 2010).

²² Os condutores metálicos referem-se ao deslocamento de eletrões em partículas carregadas negativamente. Aquino, F. R. - Estudo Comparativo entre Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas de um solo Argiloso Compactado. Brasília: Universidade de Brasília Departamento de Engenharia Civil e Ambiental 2010. Mestre

²³ A corrente eletrónica (ou ôhmica) faz-se através da transferência de carga pelo fluxo de eletrões livres num condutor metálico. Miranda Neto, M. I. de - Investigação Geoambiental em Área de Mangue na Baía de Guanabara Contaminada com Resíduos Industriais Rio de Janeiro Universidade Federal do Rio de Janeiro Ciências em Engenharia Civil 2002. Mestre

²⁴ A corrente eletrolítica dá-se através da transferência de carga, por meio da migração das partículas iônicas num meio eletrolítico em resposta a um campo elétrico. Ibid.

²⁵ A condução dielétrica dá-se em materiais pouco condutores aquando da aplicação de um campo elétrico variável no tempo (corrente alternada) que provoque a polarização das moléculas. Miranda Neto, M. I. de - Investigação Geoambiental em Área de Mangue na Baía de Guanabara Contaminada com Resíduos Industriais Rio de Janeiro Universidade Federal do Rio de Janeiro Ciências em Engenharia Civil 2002. Mestre

Em material saturado, um maior índice de vazios repercute-se numa maior área de passagem da corrente elétrica (AQUINO, 2010). Em material não saturado, a substância líquida é condutora, considerando o ar e o sólido como isolantes. Neste sentido, quanto menor for a saturação do solo, menor será o espaço disponível para a condução da corrente elétrica, repercutindo-se numa maior resistividade elétrica (PACHECO, 2004).

O tipo de solo também exerce influência na resistividade elétrica, sobretudo devido ao arranjo das partículas. Assim, quanto maior o índice de vazios do solo maior é a área de passagem da corrente possuindo desta forma uma maior condutividade elétrica (PACHECO, 2004). A alteração do tamanho das partículas leva consequentemente a uma modificação do arranjo/estrutura das mesmas exercendo alterações na resistividade medida (PACHECO, 2004).

Possuindo uma elevada percentagem de finos, a resistividade elétrica pode ser influenciada por três diferentes situações; na primeira, o índice de vazios diminui pela ocupação das partículas finas aumentando a resistividade elétrica do solo; a segunda situação, pode levar à redução da resistividade elétrica no caso da polarização das partículas; o terceiro caso, pode implicar a redução da resistividade elétrica devido ao aumento da superfície específica e do contato entre as partículas sólidas (WEEMEES, 1990).

Seguem-se alguns valores de referência de resistividade elétrica face ao tipo de solo.

Tabela 5- Alguns valores de referência de resistividade elétrica do solo. Adaptado de QENERGIA ().

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE ELÉTRICA $\Omega \cdot M$
<i>Solo pantanoso</i>	0 a 30
<i>Lodo</i>	20 a 100
<i>Argila plástica</i>	50
<i>Argila compacta</i>	100 a 200
<i>Areia argilosa</i>	50 a 500
<i>Areia de sílica</i>	200 a 3000
<i>Solo rochoso nu</i>	1500 a 3000
<i>Solo rochoso nu coberto de relva</i>	300 a 500
<i>Xisto</i>	50 a 300
<i>Micaxisto</i>	800
<i>Granitos e grés muito alterados</i>	100 a 600

A medição da resistividade elétrica do solo pode ser feita segundo várias metodologias. Podem ser realizados levantamentos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. Nos levantamentos bidimensionais, os elétrodos são mantidos a uma distância fixa, e vão sendo progressivamente movidos ao longo de uma linha reta na superfície do solo. Em cada passo realizado, uma medida é gravada. Aumentando o espaço entre os elétrodos, maior é a

profundidade obtida (SAMOUËLIAN [et al.], 2005). O conjunto de todas as medidas, num determinado espaçamento dos eléctrodos resulta num perfil de valores de resistividade.

De acordo com este esquema metodológico, várias matrizes podem ser aplicadas, sendo as mais reconhecidas e aplicadas as de Wenner, Wenner–Schlumberger, dipolo–dipolo, polo–polo ou polo–dipolo (figura 46). Aquilo que distingue as matrizes acima referidas remete para a sensibilidade da matriz, para heterogeneidades vertical e horizontal, para a profundidade da investigação, para a cobertura dos dados horizontalmente e a intensidade do sinal (Loke, 2001; Griffiths and Barker, 1993, in SAMOUËLIAN [et al.], 2005).

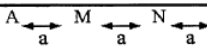
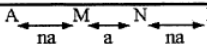
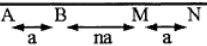
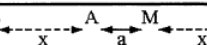
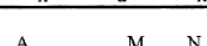
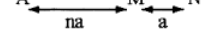

Electrodes array		K
2D	Wenner	 $2\pi a$
	Wenner-Schlumberger	 $\pi n(n+1)a$
	Dipole-Dipole	 $\pi n(n+1)(n+2)a$
	Pole-Pole	 $2\pi a$
	Pole-Dipole Forward	 $2\pi n(n+1)a$
	Reversed	
3D	Square	 $\frac{2\pi a}{2 - \sqrt{2}}$

Figura 46- Configuração das matrizes bidimensional e tridimensional. Extraído de SAMOUËLIAN [et al.] (2005). A e B correspondem à corrente eléctrica nos eléctrodos e M e N correspondem ao potencial nos eléctrodos; a- corresponde espaçamento entre os eléctrodos; n- fator de espaçamento (valores inteiros 1-6); x é a distância de “eléctrodos infinitos” no método polo-polo.

O método de Wenner é um método de quatro pontos e permite a obtenção da resistividade do solo em profundidade, sem que seja necessária a colocação dos eléctrodos a grandes profundidades. Os eléctrodos A e B são colocados nos extremos e os eléctrodos M e N no meio. A injeção da corrente ocorre nos eléctrodos A e B. A corrente ao circular pelo solo vai provocar um diferencial de potencial eléctrico nos eléctrodos M e N, que é captada pelo instrumento recetor. As distâncias entre AM, MN e NB são iguais (figura 47).

De forma a obter perfis de resistividade com indicação das várias camadas do solo e diferentes profundidades, o arranjo de Wenner é movido em linha de um ponto para outro para medir a resistividade eléctrica de pontos adjacentes. Aumentando a distância entre os eléctrodos é obtida uma maior informação em profundidade (BESSON [et al.], 2004, p. 140, DISTRIBUCIÓN, 2008).

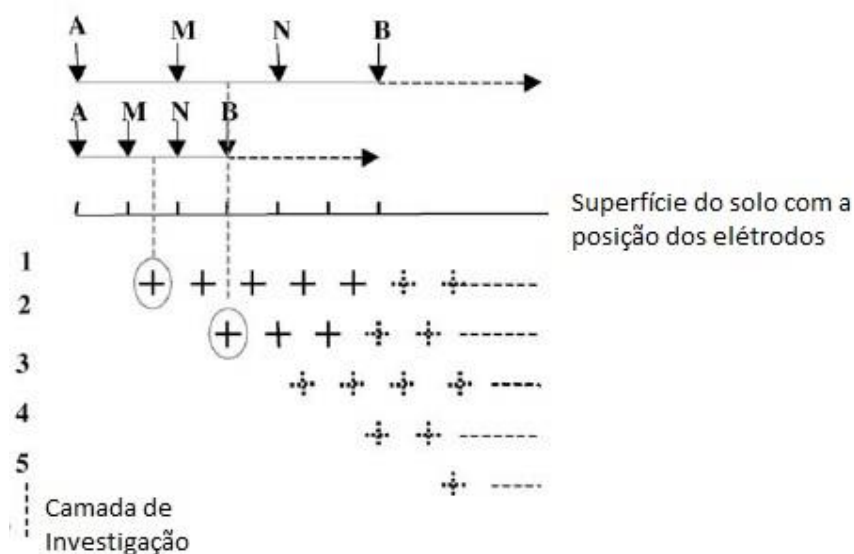


Figura 47- Método de Wenner. Adaptado de BESSON [et al.] (2004). A e B representam a injeção da corrente nos eletrodos. O potencial elétrico é medido pelos eletrodos M e N. A distância $AM = MN = NB$ representa a distância inter-eletrodos.

Foi usada a seguinte fórmula para o cálculo da resistividade elétrica do solo:

Equação 33

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R$$

Em que:

ρ - é a resistividade elétrica;

a - é a distância entre os eletrodos;

R - é o valor registado pelo equipamento.

No nosso caso de estudo foi aplicado o método de Wenner com auxílio do resistímetro (modelo SAS 300 C). Numa primeira fase, a distância entre os eletrodos remetia para 1 metro, tendo sido aumentada sequencialmente 1m em cada leitura.

Foram realizados 10 perfis de resistividade elétrica de acordo com a figura 48.



Figura 48- Localização dos perfis de resistividade elétrica efetuados.

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

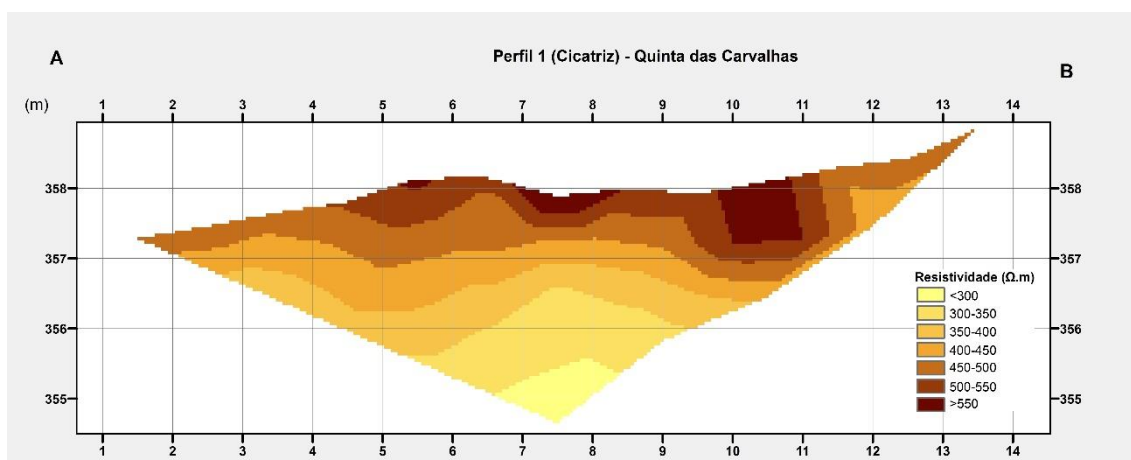


Figura 49- Perfil de resistividade 1.

O perfil 1 (figura 49) localiza-se a montante de um deslizamento. Neste caso, os valores mais elevados da resistividade elétrica localizam-se na superfície do solo, o que indica a presença de maior número de vazios próximos da superfície topográfica. Neste perfil é atingida uma resistividade $>500\Omega.m$. À medida que aumenta a profundidade os valores diminuem, facto causado pelo aumento da saturação do solo. Apesar da presença dos espaços vazios, a diminuição da resistividade é homogênea verticalmente. Neste perfil é atingida uma

profundidade superior a 3 metros. A superfície topográfica é também apresentada no perfil, apresentando uma altitude de 358 metros.

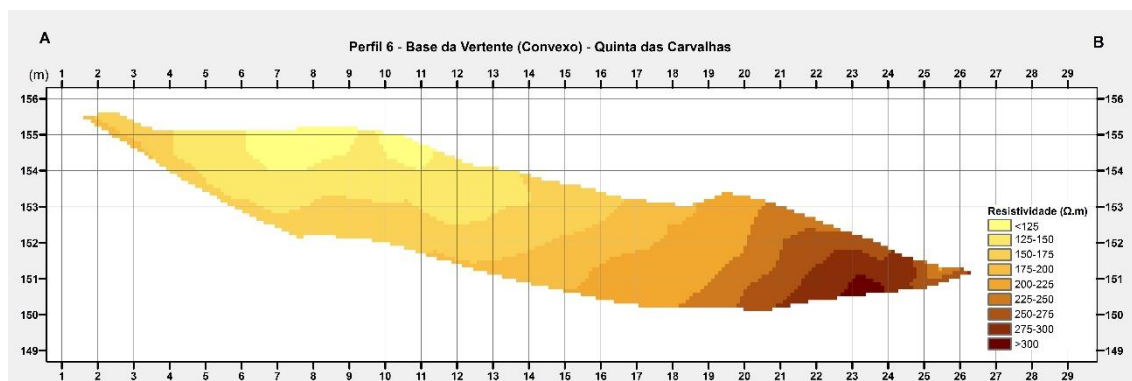


Figura 50- Perfil de resistividade 6.

O perfil 6 (figura 50), localizado na base da vertente (figura 48), de perfil convexo, apresenta valores de resistividade entre 125 e 300 Ω .m.

Há um aumento dos valores de resistividade de forma homogênea à medida que aumenta a distância em relação ao ponto inicial da experiência. Ao fim de aproximadamente 20m horizontais do ponto inicial, o aumento da resistividade também é visível em profundidade. A cerca dos 153 metros de altitude o valor de resistividade aumenta. A esta profundidade os valores são mais elevados o que significa solo não saturado. Os valores mais baixos podem ser indicadores de saturação do solo. Este perfil de resistividade é indicador da diminuição da saturação do solo à medida que caminhamos para a concavidade.

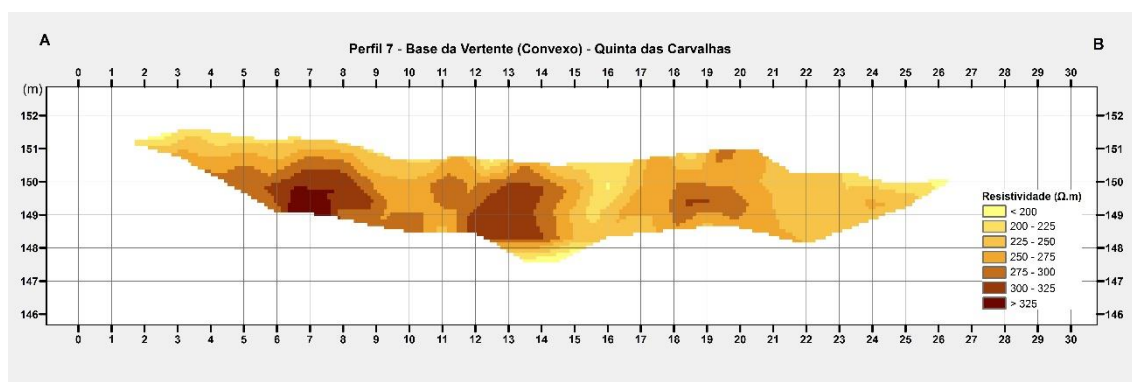


Figura 51- Perfil de resistividade 7.

O perfil de resistividade 7 (figura 51) é um perfil bastante mais complexo do que o perfil 6, na medida em que os valores de resistividade variam facilmente. Os valores mais elevados (>300 Ω .m) localizam-se em profundidade e de forma não homogênea. Estes valores mais

elevados em profundidade podem refletir a não saturação do solo, mas também a presença de espaço poroso, designadamente macroporos (*pipes*). De salientar a localização deste perfil, que se encontra na transição de traçado convexo para côncavo.

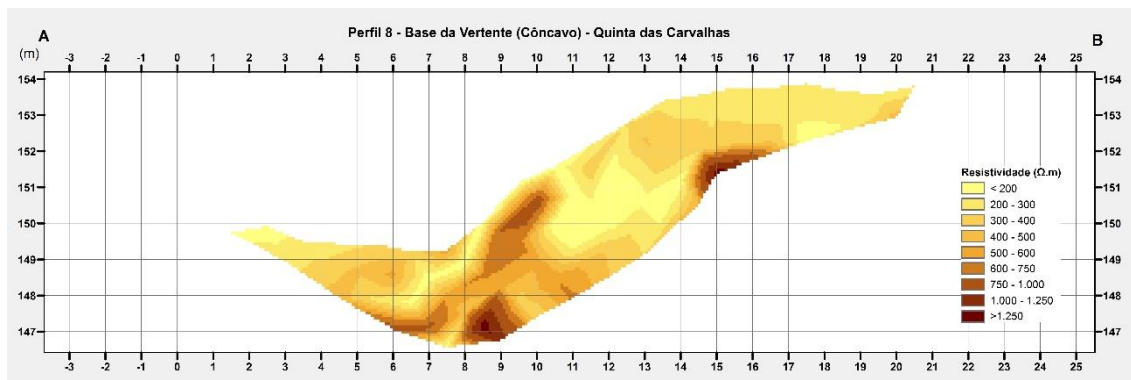


Figura 52- Perfil de resistividade 8.

O perfil de resistividade elétrica 8 (figura 52) localiza-se na base da vertente, em traçado côncavo. Neste caso os valores variam de 200 a 1250Ω.m, valores bastante elevados comparativamente com os anteriores, que se observam principalmente no interior do solo, associados à presença de espaços vazios que implicam uma maior resistividade do solo.

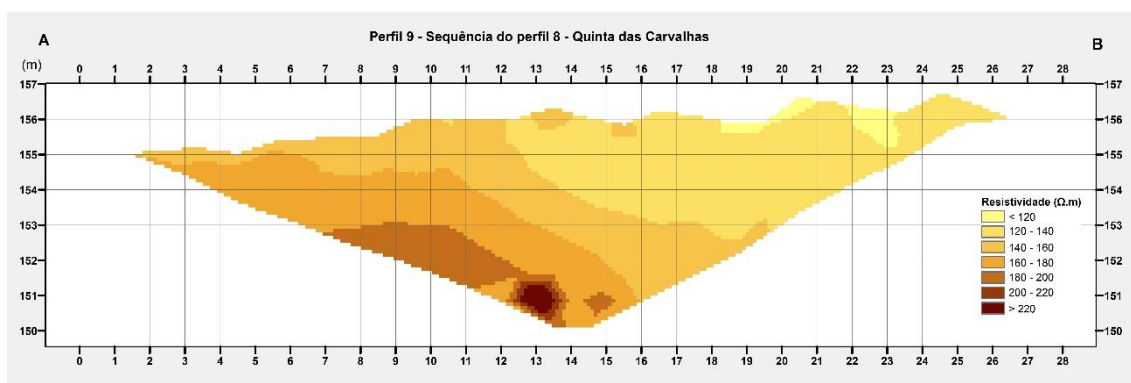


Figura 53- Perfil de resistividade 9.

O perfil de resistividade elétrica do solo 9 (figura 53) representa a sequência do perfil 8, portanto na transição da concavidade para a convexidade. É visível a diminuição da resistividade elétrica com o aumento da distância horizontal em relação ao ponto inicial. Os valores mais elevados (>220Ω.m) remetem uma vez mais para a presença de caminhos preferenciais. É também nítida uma diminuição de forma homogênea (lateralmente e em profundidade) dos

valores de resistividade. À medida que nos afastamos da concavidade, há uma diminuição da resistividade.

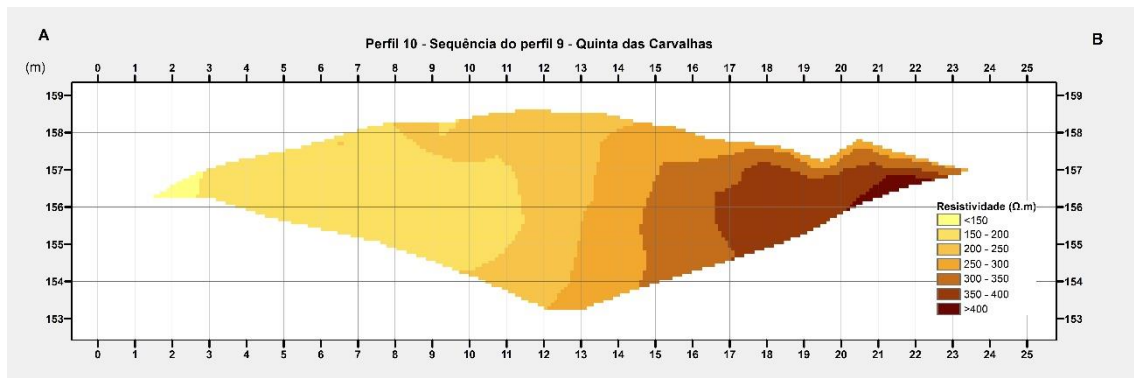


Figura 54- Perfil de resistividade 10.

Por fim, o perfil 10 (figura 54) que é a sequência do perfil 9, localiza-se na vertente exposta a Este e em traçado novamente convexo. Da figura 54 é possível verificar que os valores aumentam à medida que nos aproximamos da convexidade máxima (variabilidade horizontal). Isto indica a aproximação ao afloramento rochoso, daí os valores elevados. Ou seja, aumentando a distância horizontal ao ponto inicial aumenta também os valores de resistividade, atingindo valores de $>400\Omega.m$ aos 20 metros horizontais. Este perfil apresenta uma maior homogeneidade, na medida em que os valores vão progressivamente aumentando à medida que nos afastamos do ponto inicial.

É importante referir que os levantamentos permitem um melhor conhecimento das características terrenas e o comportamento do solo em profundidade. Este conhecimento em profundidade dá indicações do funcionamento hidrológico das vertentes, que na nossa área de estudo apresentam forte componente humana pela alteração do solo a favor da construção de vinha essencialmente em patamares.

3.4 PARÂMETROS HIDROLÓGICOS

3.4.1 Condutividade hidráulica

Baseada se na lei de Darcy, a condutividade hidráulica avalia a circulação da água no interior do solo. A lei de Darcy baseia-se no pressuposto de que uma amostra de material arenoso homogéneo, colocado num cilindro de determinado comprimento (L) e com determinada área transversal (A), fica submetido a uma carga constante (h). Findo algum tempo,

a amostra evolui para o estado de saturação e o fluxo de saída (Q) deixa de variar com o tempo atingindo o equilíbrio. Deste modo, a velocidade de fluxo depende da variação da condutividade hidráulica (GOMES, 2012). A lei de Darcy baseia-se por isso na seguinte equação:

Equação 34

$$K = \frac{QL}{At}$$

Em que:

K - é a condutividade hidráulica (L/T);

Q- representa o fluxo constante medido no campo (L³/T);

L- é o comprimento da coluna do solo;

A - refere-se à secção transversal (L²);

H- representa a carga constante (L).

A condutividade hidráulica como já foi referido, representa a facilidade com que o solo transmite um fluido em meio poroso, dependendo tanto do meio como do fluido (Freeze e Cherry, 1979, in GOMES, 2012, MESQUITA and MORAES, 2004). De acordo com BRADY (1989) depende diretamente das dimensões, da geometria e da configuração dos poros do solo (in GOMES, 2012). O valor máximo de condutividade hidráulica é atingido quando o solo está saturado, passando a denominar-se de condutividade hidráulica saturada (k_{sat}) (Reichardt, 1990, in MESQUITA and MORAES, 2004).

Através da condutividade hidráulica, pode-se aferir parâmetros hidrológicos como a condutividade hidráulica saturada, a matriz de fluxo potencial e o parâmetro alfa.

A condutividade pode ser saturada (K_{sat}) quando os poros do solo estão completamente preenchidos por água, possuindo um valor constante e máximo de K. Será não saturada ($K_{\tilde{r}sat-\theta}$) quando os poros estão parcialmente preenchidos com água e é função da humidade volumétrica disponível no solo (Frezza e Cherry (1979) e Brady (1989), in GOMES, 2012). No levantamento de campo da condutividade hidráulica, acaba por existir sempre uma pequena quantidade de ar nos poros, o que não permite uma saturação total mas uma “subsaturação” do solo. Neste caso, denomina-se condutividade hidráulica saturada de campo (k_{fs}) (Reynolds e Elrick ,1978, in GOMES, 2012).

A condutividade hidráulica saturada (K_{fs}) caracteriza-se pela velocidade média constante percorrida pela água por unidade de tempo numa secção do solo por troca com ar do seu interior, sendo expresso o seu valor em cm/s (TEIXEIRA, 2012).

A matriz de fluxo potencial (ϕ_m) representa a capacidade que um solo possui de absorver água pelo efeito da capilaridade, expressando-se em cm²/s (TEIXEIRA, 2012).

O parâmetro alfa (α) representa as características de textura e principalmente de estrutura do solo (Reynolds e Elrick, 1985, in GOMES, 2012). Este parâmetro representa a *razão entre a gravidade e as forças de capilaridade durante a infiltração ou drenagem (...)* (White e Shully, 1987, in MARQUES, 2007, p. 181). Valores altos de α refletem que o movimento da água é essencialmente gravítico, o que se verifica normalmente em solos de textura grosseira. Pelo contrário, valores baixos de α refletem solos de textura fina e/ou mal estruturados, o que significa que predominam as forças de capilaridade em relação à gravidade (MARQUES, 2007).

Procedeu-se ao levantamento de campo da condutividade hidráulica saturada (k_{fs}) recorrendo ao permeâmetro de Guelph, modelo 2800 KI Guelph (figura 55 e 56) desenvolvido por Reynolds e Elrick em 1983. É um instrumento de furo e de carga constante (Reynolds e Elrick, 1985, in GOMES, 2012).

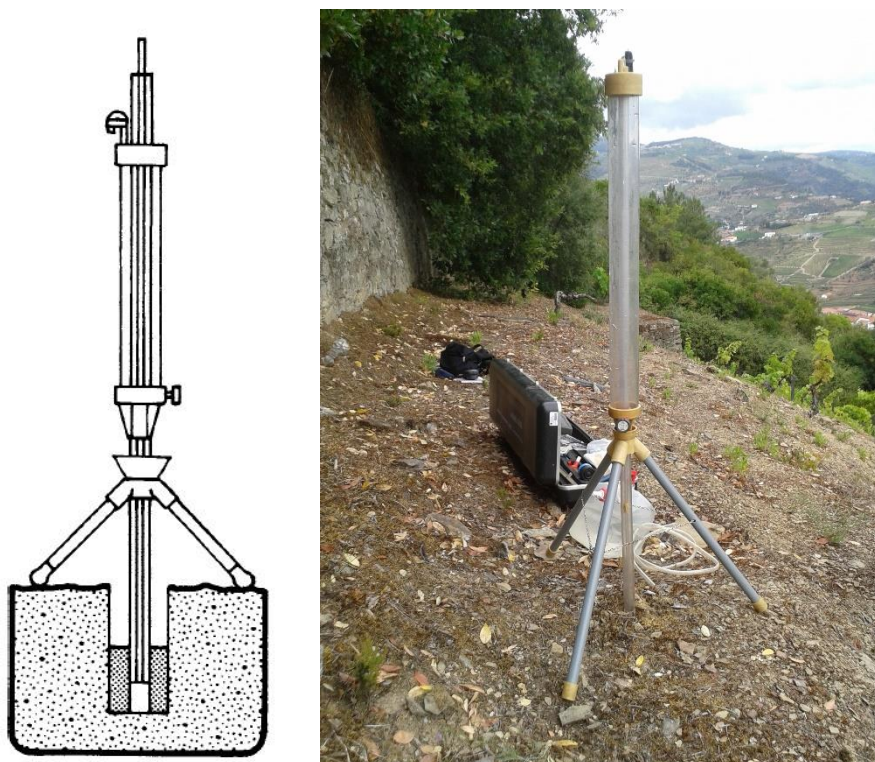


Figura 55- Permeâmetro de Guelph.

Para a realização dos testes foi necessário a abertura de um orifício no solo, com uma profundidade de 30cm e 6cm de diâmetro. Em cada teste foram realizadas leituras com duas cargas de pressão, uma aos 5 cm (H1) e outra aos 10 cm (H2).

A utilização do permeâmetro permite aplicar dois procedimentos no cálculo da condutividade hidráulica saturada, tendo em conta o tipo de solo e a litologia. O método do reservatório combinado utiliza-se quando há uma forte permeabilidade do solo, como por

exemplo quando domina a fração arenosa (SOILMOISTURE, 2008). Este método também é usado quando a estrutura das formações superficiais possuem uma elevada facilidade de circulação de água no solo (SILVÉRIO, 2000). O método do reservatório linear é mais indicado para solos pouco permeáveis, constituídos essencialmente por argilas (SOILMOISTURE, 2008).

Devido ao tipo de solos da área de estudo, adotou-se a metodologia do método do reservatório linear por se considerar mais apropriada. Para o cálculo dos diferentes parâmetros, recorreu-se às seguintes fórmulas:

Equação 35

$$Kfs = (0.0041)(Y)(R2) - (0.0054)(Y)(R1)$$

Em que:

K_{fs} - condutividade hidráulica saturada de campo expressa em cm/seg;

Y- valor do constante utilizado com o método linear e expressa-se em cm^2 (2,16 cm^2);

R_1 - valor da constante com água estabilizada. Reservatório de 5 centímetros (H1/60 s);

R_2 - valor da constante com água estabilizada. Reservatório de 10 centímetros (H2/60 s).

Para o cálculo da matriz de fluxo potencial (ϕm) e o parâmetro alfa (α) foram utilizadas as seguintes equações respetivamente:

Equação 36

$$\phi m = (0.0041)(Y)(R1) - (0.0237)(Y)(R2)$$

Equação 37

$$\alpha = (Kfs)/(\phi m)$$

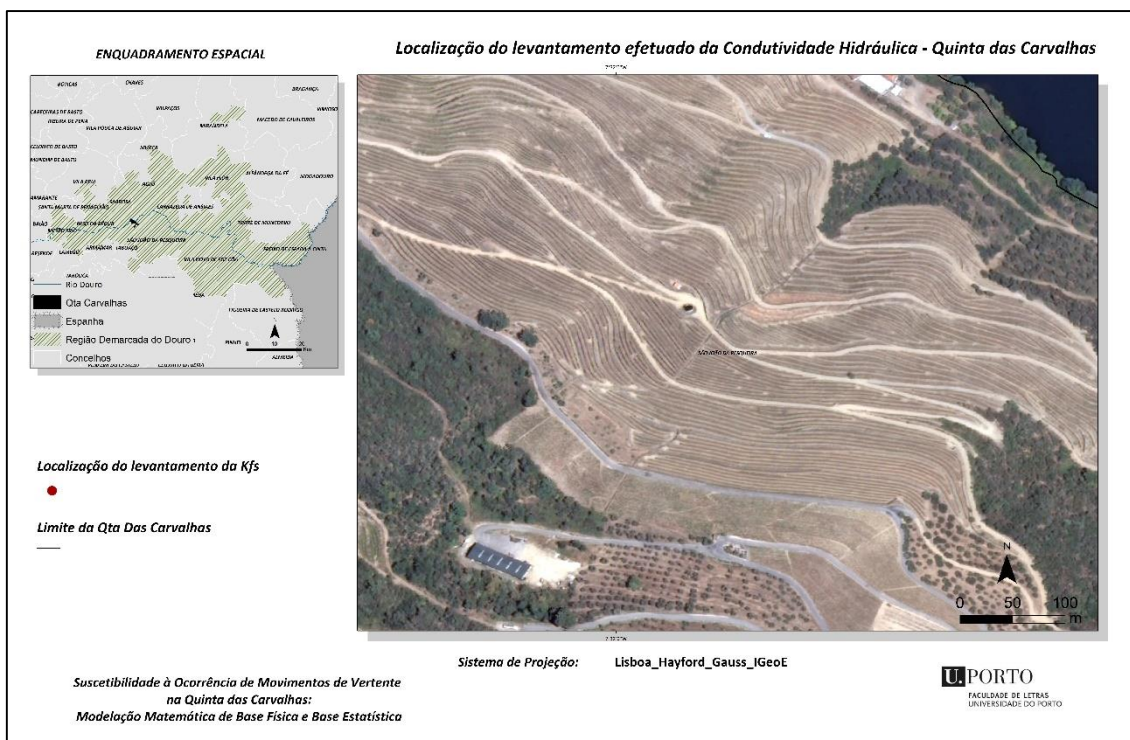


Figura 56- Localização dos levantamentos efetuados da K_{fs} .

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

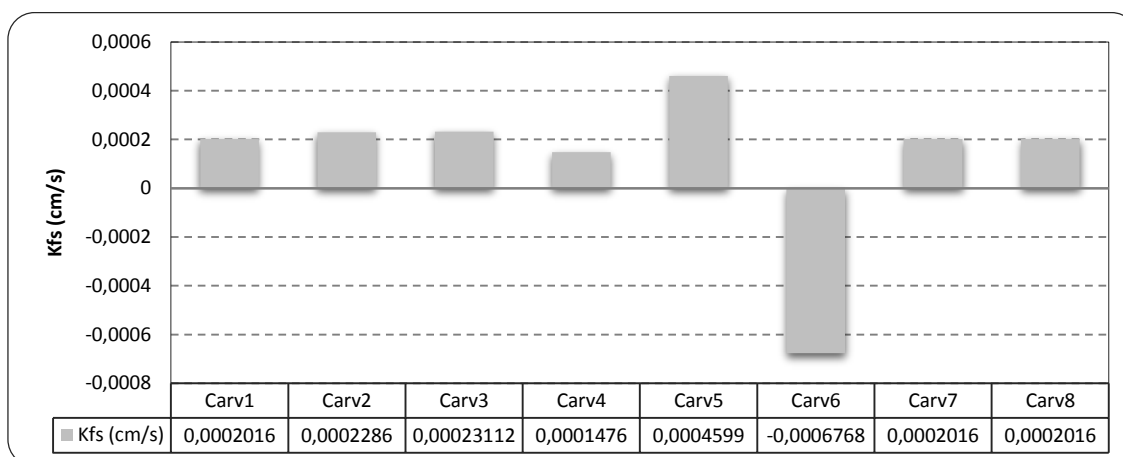


Figura 57- Resultados do levantamento no terreno da condutividade hidráulica saturada de campo.

Da leitura do gráfico da figura 57 é de salientar a existência de valores negativos nomeadamente do ponto “Carv6”. O ponto “Carv6” localiza-se na base da vertente com exposição a Este. Os valores negativos devem-se essencialmente a descontinuidades

hidrológicas²⁶, estratificação em camadas/canais e a características texturais dos solos²⁷ (SILVÉRIO, 2000).

Em três levantamentos efetuados, nomeadamente em “Carv1”, “Carv7” e “Carv8”, os valores de K_f são iguais (0.0002016 cm/s). Ou seja, os pontos apresentam características hidrológicas e físicas semelhantes.

A experiência com valores de K_f mais elevada e consequentemente com melhor capacidade de circulação do solo remete para o ponto “Carv5”, que se localiza a meia vertente na convexidade exposta a Norte. Em contrapartida, o valor mais baixo de K_f (Carv4) remete igualmente para a meia vertente, traçado igualmente convexo mas com exposição a Este. Esta diferença de resultados pode dever-se à estrutura dos materiais. À partida o ponto “Carv5” apresenta uma maior porosidade o que facilita uma maior circulação da água no solo.

O ponto “Carv3” apresenta o 2º valor com maior capacidade de circulação interna da água. No entanto também coincide com valores de áreas contributivas elevadas, o que significa uma concentração de fluxo subsuperficial. Em situações de precipitação intensa pode promover a saturação do solo mais rapidamente e consequentemente a instabilidade da vertente.

Os pontos “Carv3” e “Carv4” encontram-se em áreas côncavas, áreas privilegiadas de convergência de fluxo subsuperficial o que promove a saturação do solo. A circulação reduzida interna dá água potencia a instabilidade.

Estes valores podem ser comparados com outros levantamentos de campo efetuados, no entanto com características geológicas e litológicas diferentes. No trabalho desenvolvido por TEIXEIRA (2012), procedeu-se de igual modo ao levantamento da condutividade hidráulica. É uma área essencialmente granítica e apresenta um valor máximo de k_f de aproximadamente 0.00399 cm/s. Por outro lado, comparando os dados com os levantamentos efetuados na Serra da Aboboreira (SILVÉRIO, 2000), os valores de K_f atingem valores médios de 0.00073 cm/s com o método do reservatório combinado, devido à formação litológica do local, essencialmente granítica. Independentemente do método utilizado, os valores de k_f da Serra da Aboboreira

Tabela 6 - Valores de referencia de K. Adaptado de Freeze e Cherry, 1979, in GOMES (2012, p. 24).

GRAU DE PERMEABILIDADE	TEXTURA	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA
Permeável	Cascalhos	10^{-1} cm/s a 10^{-2} cm/s
Baixa permeabilidade	Argila-arenosa	10^{-2} cm/s a 10^{-3} cm/s
Impermeável	Argila homogênea	10^{-7} cm/s a 10^{-9} cm/s

²⁶ Presença de fendas, “pipes”.

²⁷ Ver capítulo 3- Parâmetros Físicos- Textura dos Solos.

evidenciam-se bastante superiores em relação à Quinta das Carvalhas (valor máximo de 0.0004599 cm/s).

A k_{fs} média da Quinta das Carvalhas é de 0,000819 cm/s, valor que se enquadra, de acordo com a tabela 6, numa baixa permeabilidade.

A condutividade hidráulica apresenta valores muito reduzidos o que é concordante com a textura fina das formações geológicas da área de estudo, que dificultam o escoamento pelo fluxo interno lento da água infiltrada, facilitando o processo de saturação dos solos (BATEIRA, 2013). Valores baixos de k_{fs} repercutem-se na fraca circulação interna da água o que pode originar instabilidade geomorfológica²⁸

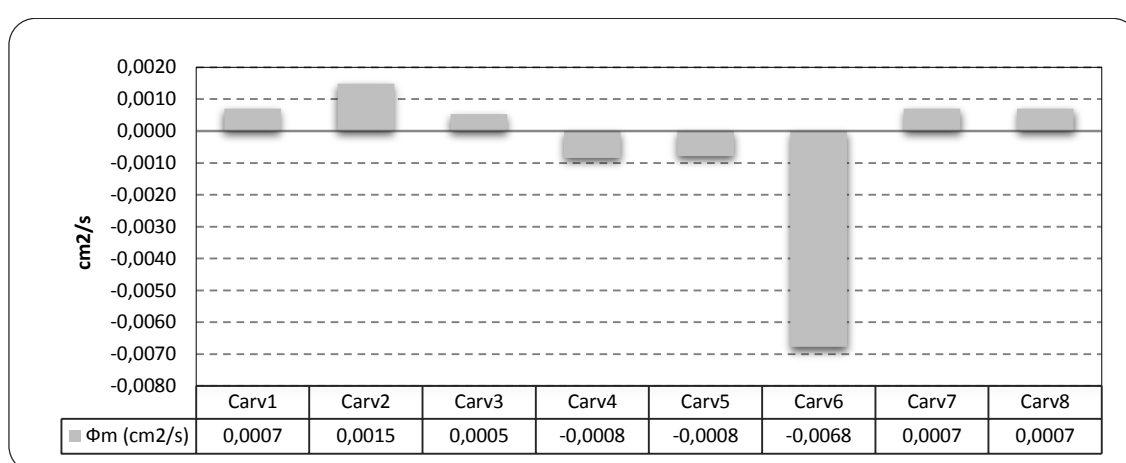


Figura 58- Matriz de fluxo potencial. Quinta das Carvalhas.

Relativamente à matriz de fluxo potencial (Φ_m), esta apresenta valores mais variáveis (figura 58). Primeiro, o ponto “Carv6” apresenta um valor negativo, facto que também aconteceu na K_{fs} . Os pontos “Carv4” e “Carv5” também apresentam valores negativos. Ambos se localizam a meia vertente, em traçado convexo. Esses valores negativos que indicam a presença de discontinuidades, sugerem a ocorrência de fluxo interno rápido. Caso haja um processo de bloqueio neste tipo de escoamento, o processo evolui para um fluxo interno saturado.

Comparando os valores obtidos nos levantamentos efetuados na Serra da Aboboreira (com valores médios a atingirem os 0.0078 cm²/s) com os valores da Quinta das Carvalhas (com o valor máximo de 0.0015 cm²/s), os valores atingidos na Serra da Aboboreira devem-se ao tipo de formação superficial, de origem granítica e texturas médias a grosseiras (SILVÉRIO, 2000).

²⁸ Ver capítulo 2- Fatores Condicionantes e Desencadeantes dos Movimentos de Vertente.

Portanto, na Serra da Aboboreira (área de Castelo) há uma maior absorção da água por capilaridade do que na Quinta das Carvalhas.

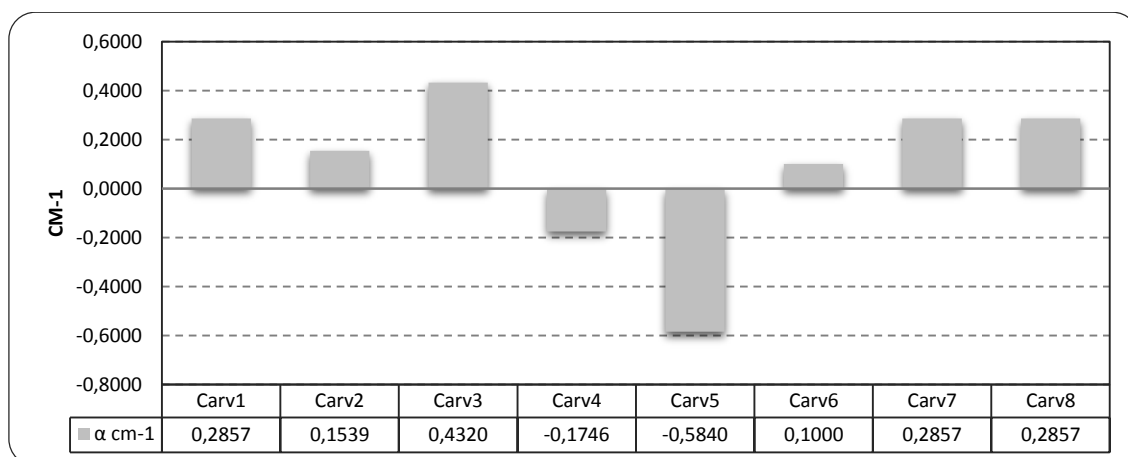


Figura 59- Parâmetro Alfa - Quinta das Carvalhas.

Por fim, analisamos o parâmetro alfa (figura 59), que representa a razão entre as forças de gravidade e o efeito da capilaridade (White & Sully, 1987, in MARQUES, 2007).

Da leitura da figura 59 é de salientar a presença novamente de valores negativos dos pontos “Carv4” e “Carv5”. Apesar de continuarem representados os valores negativos, os mesmos não podem ser utilizados para comparação com outros dados.

Dos dados obtidos, o ponto “Carv3” apresenta um valor mais elevado comparativamente com os restantes, indicando uma maior velocidade de circulação da água no solo. Este ponto localiza-se em vertente côncava e a meia vertente o que se poderá relacionar com o facto de serem áreas privilegiadas de circulação da água. São áreas de convergência da drenagem e recebem partículas e sedimentos dispersos da vertente convexa. Este ponto apresenta uma percentagem de finos (silte e argila) que ronda os 50%, percentagem de areia de 15% e por fim 34% de cascalho.

O ponto “Carv6” apresenta o valor mais baixo, indicando baixa velocidade de circulação da água no solo. O que é concordante com as texturas do solo, pois apresentam uma percentagem de finos de 67%. A elevada percentagem de finos evidencia a presença de microporos²⁹ que refletem a fraca velocidade de circulação de água no solo.

Na serra da Aboboreira (áreas graníticas) os valores médios de α ($0,4337 \text{ cm}^{-1}$) são superiores em relação aos atingidos na Quinta das Carvalhas. Portanto as diferenças devem-se essencialmente à litologia, textura e estrutura do solo.

²⁹ A presença de texturas finas e microporos indica a forte capacidade de reter água.

Os valores padrão de α podem ser verificados na tabela 7 (ELRICK [et al.], 1989). Valores altos de α indicam que o movimento da água é principalmente gravítico, associados a texturas grosseiras e/ou estruturas fortes. Valores baixos de α indicam que as forças de capilaridade se sobrepõem às da gravidade e estão associados a texturas finas e/ou mal estruturados (MARQUES, 2007).

Tabela 7- Valores de alfa (α) tendo em conta a textura e estrutura do solo. Adaptado de (ELRICK [et al.], 1989).

TIPO DE SOLO	α cm ¹
Materiais sem estrutura, argilosos e ou siltosos, sedimentos marinhos, etc.	0,01
Solos com textura fina (siltosa ou argilosa) e sem estrutura. Algumas areias finas podem ser incluídas.	0,04
Solos argilosos a siltosos com estrutura. Incluem-se as areias finas a médias.	0,12
Solos compostos por areias grossas ou materiais de maior granulometria. Podem estar incluídos solos de estrutura bem definida e/ou com a presença de fendas e outros tipos de macroporos.	0,36

Da análise da tabela 7, é possível verificar que os pontos “Carv 2” e “Carv6” aproximam-se dos valores de α com características de solos argilosos e siltosos com estrutura, sendo incluídas as texturas finas a médias. O ponto “Carv 2” apresenta uma percentagem de finos de 49%, areia de 12% e cascalho de 40%, sendo por isso uma textura cascalho-lodoso. O que é concordante com os valores padrão de α . O ponto “Carv6” também se enquadra neste grupo e apresenta 67% de finos, 7% de areia e 26% de cascalho, possuindo portanto uma textura lodosa-cascalhenta. Os restantes valores de α aproximam-se mais do grupo de solos com a presença de fendas e outros tipos de macroporos, o que reflete, em termos hidrológicos, a existência de um fluxo de escoamento interno rápido.

3.4.2 Capacidade de infiltração do solo

A camada mais superficial da crosta terrestre é designada habitualmente de zona vadosa, ou zona não saturada, possuindo características extremamente importantes na compreensão de todo o ciclo hidrológico e consequentemente na hidrologia das vertentes e na capacidade de infiltração do solo. Nesta camada (figura 60) existe um sistema que tem na sua constituição: sólidos (minerais e orgânicos); líquidos (água e solutos) e gases como vapor de água entre outros (Fetter, 1999, 2001, in MARQUES, 2007).

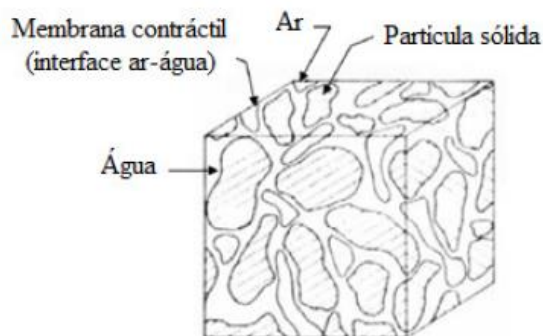


Figura 60- Elementos constituintes de um solo não saturado (Fredlund e Rahardjo, 1993, in FERNANDES, 2011, p. 30).

De acordo com VARELA (1993) e FETTER (1999) *a zona vadosa constitui a zona de transição entre a parte superficial e subterrânea do ciclo hidrológico, portanto estende-se entre a superfície terrestre e a zona freática* (in MARQUES, 2007, p. 155). É precisamente nesta zona que fenómenos como a infiltração ocorrem. Este processo caracteriza-se pelo *movimento de água da superfície topográfica para a camada superior do solo ou maciço rochoso* (MARQUES, 2007, p. 155).

A zona vadosa divide-se em três camadas MEINZER (1923) e é na subzona superior que a água sofre o processo de infiltração, evapotranspiração ou drenagem gravítica. Esta subzona estende-se entre a superfície topográfica e o limite inferior da raiz das plantas, que corresponde normalmente aos horizontes dos solos mais superficiais. Devido ao processo de infiltração, esta subzona pode sofrer de saturação temporária devido à precipitação ou sistema de rega (Todd, 1980, Varela, 1993, Dingman, 1994, in MARQUES, 2007).

Entende-se por infiltração a entrada de água nas camadas do solo mais superiores (subzona superior), próximo à superfície do solo, que se movimenta no sentido descendente através dos vazios existentes, alterando a humidade inicial do solo. Este processo dá-se principalmente pela ação da gravidade e/ou capilaridade, dependendo da quantidade de água disponível para a infiltração. Determinados fatores influenciam o processo, a destacar: o tipo de solo, a humidade inicial do solo, a cobertura vegetal, o declive, a intensidade e duração da precipitação e a temperatura (FERNANDES, 2011).

Na área de estudo foram realizados testes de infiltração, recorrendo ao infiltrômetro de duplo anel. O infiltrômetro de duplo anel é constituído por 2 anéis de metal concêntricos, um interno e outro externo que são colocados no solo a alguns centímetros de profundidade. No momento de realização da experiência é colocada água no cilindro interno e externo. O registo

da variação da água³⁰, efetua-se no cilindro interno com auxílio de um cronómetro, até que haja infiltração total da água no cilindro interno, ou aquando da estabilização da variação do nível da água.

Após a realização das experiências, os dados foram tratados tendo sido calculadas as taxas de infiltração (i), que segundo LIBARDI (1995) *relaciona-se com a infiltração acumulada* (I), *que se define pelo volume de água infiltrada que atravessa a unidade de área do solo por unidade de tempo* (in FERNANDES, 2011, p. 49). Neste trabalho foi adotada a seguinte fórmula da taxa de infiltração dos dados de campo levantados:

Equação 48

$$i = \frac{dl}{dt}$$

Em que (i) representa a taxa de infiltração, (I) é a infiltração acumulada e (t) representa o tempo. A infiltração acumulada foi conseguida através do somatório da variação existente entre a primeira (minuto zero) e a segunda leitura (minuto 1). Ao fim de 30 minutos por exemplo, temos o somatório da variação (quantidade de água infiltrada em cm) entre a primeira (minuto zero) e a última leitura (minuto 30)³¹.

O levantamento da capacidade de infiltração do solo coincidiu com os levantamentos de k_{fs} , texturas de solo e resistividade elétrica. Foram realizadas 6 experiências de campo (figura 61).

³⁰ Água infiltrada num determinado intervalo de tempo, tendo sido no caso pratico de 30 segundos.

³¹ Outras metodologias podem ser utilizadas na obtenção e simulação do processo de infiltração, designadamente modelos que expressam matematicamente o fluxo de água em meios porosos. Destacam-se os modelos empíricos de KOSTIAKOV (1932), KOSTIAKOV-LEWIS (1932) e HORTON (1940) Fernandes, Mariana Alher - Condutividade Hidráulica Não Saturada de um Solo Aneroso: Aplicação do Infiltrômetro de Disco. São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2011. Mestre e os modelos teóricos nomeadamente de GREEN E AMPT (1911) e de PHILIP (1957) Fernandes, Mariana Alher - Condutividade Hidráulica Não Saturada de um Solo Aneroso: Aplicação do Infiltrômetro de Disco. São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2011. Mestre

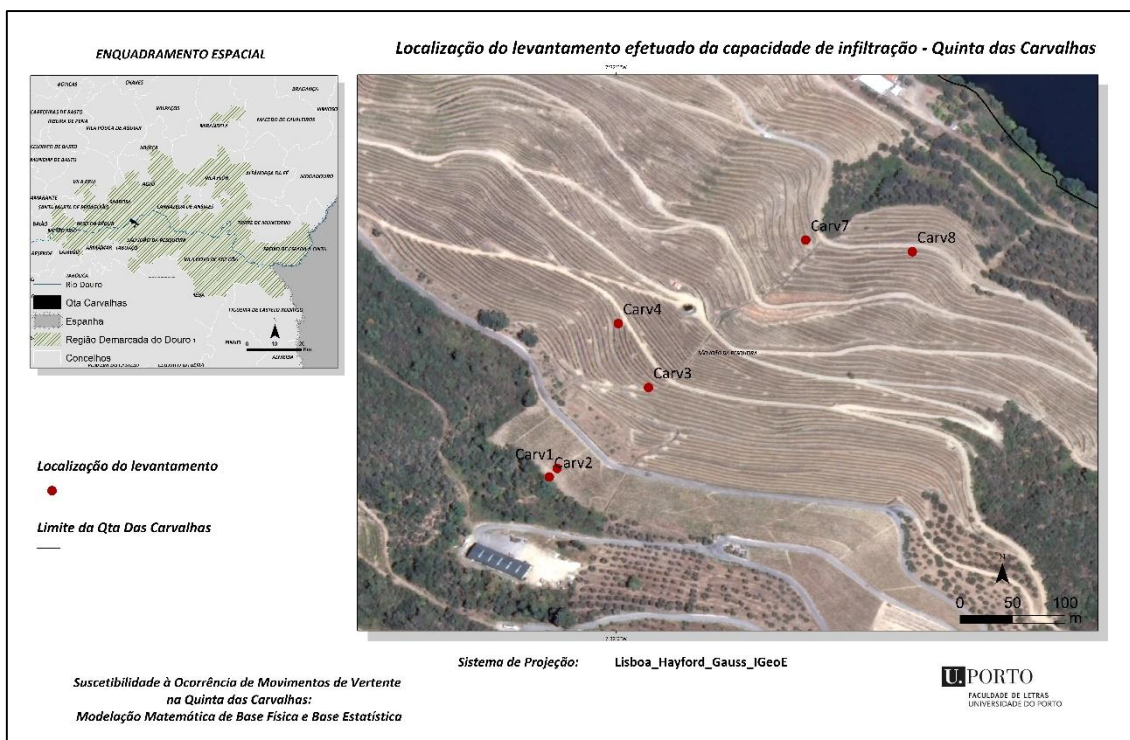


Figura 61- Localização espacial dos levantamentos efetuados da capacidade de infiltração.

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

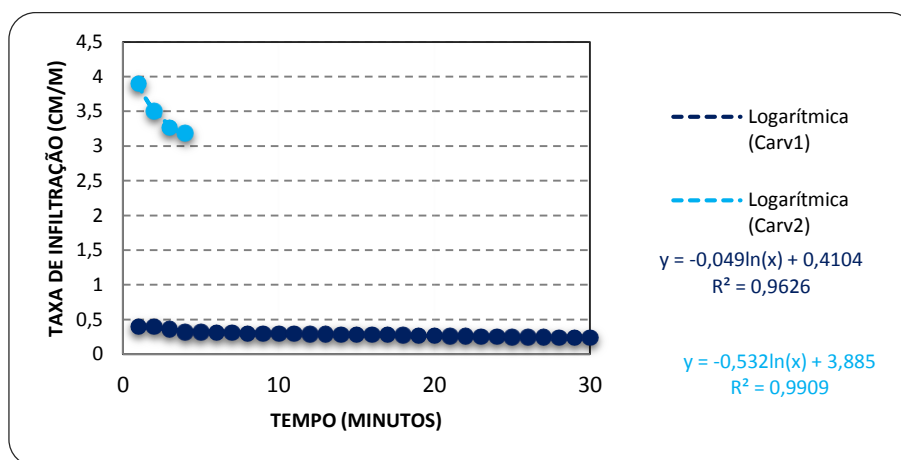


Figura 62- Taxa de infiltração dos pontos Carv1 e Carv2.

A figura 62 evidencia os pontos experimentais no material deslizado (Carv1) e a montante do deslizamento (Carv2), uma das áreas críticas de instabilidade na Quinta das Carvalhas.

O ponto “Carv1” possui uma taxa de infiltração inicial de 0.4 cm/min. A experiência decorreu em 30 minutos. Findo o ensaio, verificou-se uma infiltração total de água de 7.2cm.

Em termos de taxa de infiltração, corresponde a um valor de 0.24cm/min. Posto isto, é notório o decréscimo gradual da taxa de infiltração há medida que decorreu a experiência.

Em contrapartida o ponto “Carv2” possui valores bastante diferentes. Neste caso, a experiência apenas decorreu em cerca de 4 minutos, uma vez que a água se infiltrou na totalidade. No primeiro minuto da experiência a taxa de infiltração era de 3.9cm/min, valor esse bastante superior ao “Carv1”, com apenas 0.4cm iniciais de infiltração. Ao fim de 4 minutos, a taxa de infiltração era de 3.2cm/min, correspondendo a uma infiltração de 10.5cm, novamente valores muito superiores ao outro ponto.

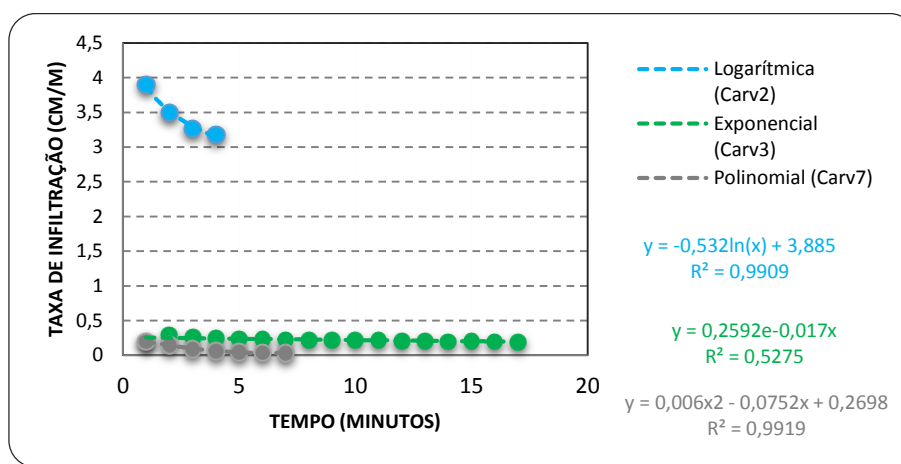


Figura 63- Taxa de infiltração dos pontos Carv2, Carv3 e Carv7.

Na figura 63 pretende-se compreender o comportamento da infiltração em vertentes côncavas. Como já foi referido anteriormente o ponto “Carv2” possui uma capacidade de infiltração bastante elevada.

O procedimento experimental em “Carv3” decorreu em 17 minutos. Foi dada por terminada a experiência pelo fato da variação ocorrida entre cada leitura ser semelhante. No primeiro minuto da experiência a taxa de infiltração foi de 0.2cm/min, ao fim dos 17 minutos, a taxa de infiltração viu-se reduzida a 0.19cm/min, ou seja um valor próximo da taxa de infiltração inicial. Neste caso, entre a primeira leitura e a última leitura houve uma infiltração total de 3.3cm. Este ponto contemplou um decréscimo pouco acentuado da taxa de infiltração ao longo do tempo.

Por fim, a experiência do ponto “Carv7”, contou apenas com 7 minutos, pelo facto de a variação ser contínua. No primeiro minuto da experiência a taxa de infiltração era de 0.3cm/min. Houve por isso uma infiltração de 0.3cm, que se assemelha ao ponto “Carv3”. Ao fim dos 7 minutos a taxa de infiltração era de aproximadamente 0.24cm/min, refletindo uma infiltração total entre o início e fim da experiência de 1.5cm de infiltração. Se compararmos esta taxa

infiltração com o ponto “Carv3” aos 7 minutos, denota-se uma equivalência nos dados levantados (0.23cm/min), evidenciando características bastante semelhantes na capacidade de infiltração verificada.

Nesta comparação, apenas o “Carv2” possui valores enviesados e bastante diferentes, pelo fato de se localizar a montante do deslizamento translacional ocorrido.

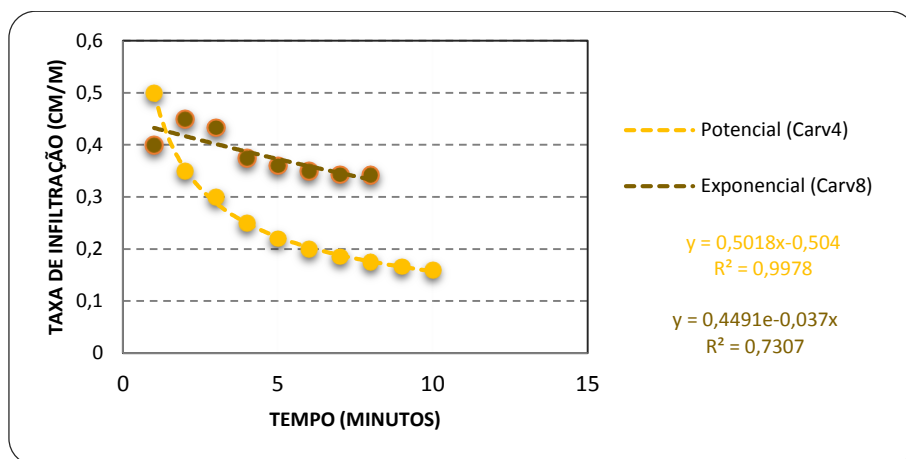


Figura 64- Taxa de infiltração dos pontos Carv4 e Carv8.

O gráfico da figura 64 pretende avaliar as diferentes taxas de infiltração, a meia vertente (Carv4) e na base da vertente (Carv8) que apresentam um traçado convexo.

O procedimento experimental “Carv4” decorreu em 10 minutos. Deu-se por concluída a experiência pelo fato das variações serem semelhantes. Ao fim do primeiro minuto de experiência a taxa de infiltração era de 0.5cm/min. Ao fim dos 10 minutos de experiência, a taxa de infiltração resumiu-se a 0.16cm/min. Houve por isso uma infiltração total de 1.6cm. O decréscimo foi gradual e contínuo.

No ponto “Carv8” os valores são mais inconstantes. A experiência decorreu em 8 minutos e no primeiro minuto, a taxa de infiltração remetia para 0.4cm/min. Ao fim dos 8 minutos experimentais a taxa de infiltração era de 0.34cm/min, correspondendo a uma infiltração total de 2.5cm, valor esse relativamente superior ao ponto “Carv4” (1.6cm). Esta diferença de valores pode dever-se às características texturais e estruturais do solo.

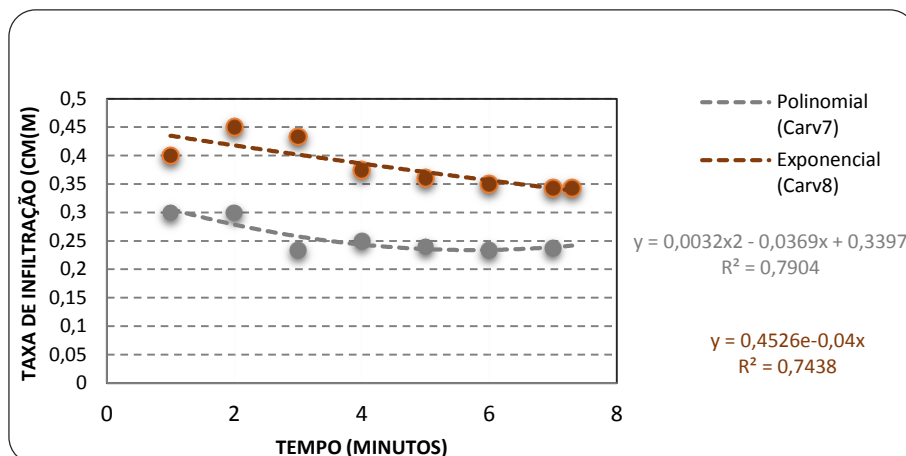


Figura 65-Taxa de infiltração dos pontos Carv7 e Carv8.

Com o gráfico da figura 65 pretende-se compreender a existência de alguma relação com a forma da vertente. As experiências foram realizadas na base da vertente na concavidade (Carv7) e convexidade (Carv8).

No primeiro minuto de experiência (Carv7) a taxa de infiltração era de 0.3cm/min. Ao fim dos 7 minutos a taxa de infiltração era aproximadamente de 0.24cm/min, refletindo uma infiltração total entre o início e fim da experiência de 1.5cm.

No ponto “Carv8”, no primeiro minuto, a taxa de infiltração remetia para 0.4cm/min, contrapondo com a infiltração de 0.3cm/min do ponto “Carv7”. Ao fim dos 8 minutos experimentais a taxa de infiltração era de 0.34cm/min, correspondendo a uma infiltração total de 2.5cm, valor relativamente superior ao ponto “Carv7” (1.5cm).

Verificou-se uma ligeira diferença de valores, onde o ponto localizado na parte convexa da vertente possui valores ligeiramente mais elevados relativamente à concavidade da vertente. Neste caso, a vertente convexa apresenta uma maior taxa de infiltração comparativamente com o traçado côncavo.

Com o objetivo de esclarecer a possível diferenciação entre concavidade, convexidade, efetuou-se uma nova comparação a meia vertente.

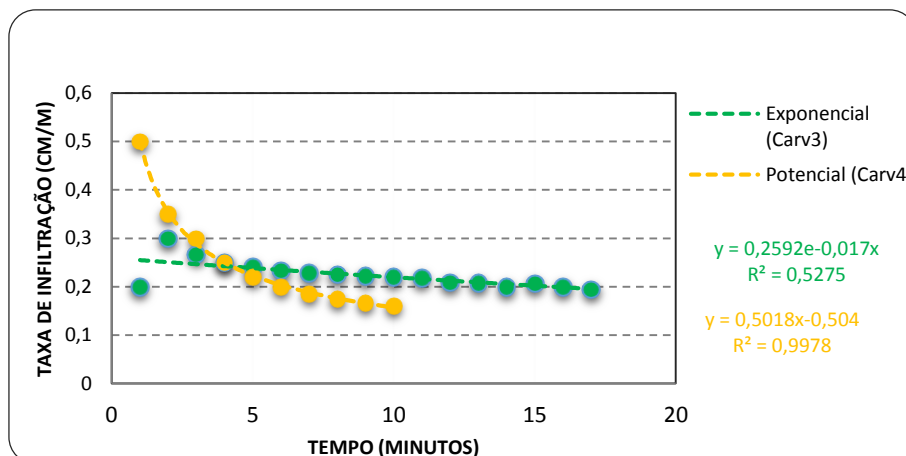


Figura 66- Taxa de infiltração dos pontos Carv3 e Carv4.

O ponto “Carv3” refere-se à parte côncava da vertente e possui várias oscilações visíveis no gráfico da figura 66. No primeiro minuto da experiência a taxa de infiltração foi de 0.2cm/min. Ao fim dos 17 minutos, a taxa de infiltração viu-se reduzida a 0.19cm/min, ou seja um valor próximo da taxa de infiltração inicial. Neste caso, entre a primeira leitura e a última leitura houve uma infiltração total de 3.3cm. Este ponto contemplou um decréscimo pouco acentuado da taxa de infiltração ao longo do tempo.

Em contrapartida, o ponto “Carv4” localizado na convexidade da vertente, ao fim do primeiro minuto de experiência tinha uma taxa de infiltração de 0.5cm/min. Uma infiltração superior à infiltração inicial do ponto “Carv3” (0.2cm). Ao fim dos 10 minutos de experiência, a taxa de infiltração resumiu-se a 0.16cm/m, ou seja, houve uma infiltração total de 1.6cm. Comparando este valor, aos 10 minutos da experiencia no ponto “Carv3”, conclui-se que o ponto “Carv3” possui uma maior capacidade de infiltração. Neste caso, é a vertente côncava que apresenta um valor um pouco superior da taxa de infiltração.

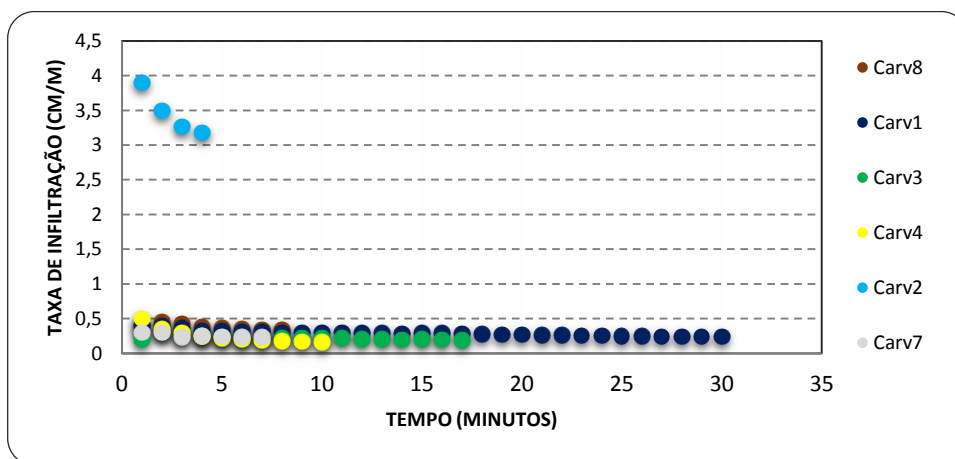


Figura 67- Taxa de infiltração dos pontos levantados.

Na realidade, analisando de uma forma geral as taxas de infiltração obtidas (figura 67), é evidente que os valores se aproximam bastante, com exceção do ponto “Carv2” que como foi referido apresentou uma taxa elevada.

Em suma, apesar das dificuldades em encontrar tendências, é possível comparar valores com diferentes litologias. Em granitóides, nomeadamente na Serra da Aboboreira (SILVÉRIO, 2000), os valores médios da taxa de infiltração variam entre os 4.45cm/min (no primeiro minuto da experiência) e os 2.94cm/min (no último minuto), valores consideravelmente superiores à média obtida na Quinta das Carvalhas (1.5 e 0.24cm/m).

3.4.3 Síntese dos parâmetros de campo levantados

A análise individual de cada parâmetro é necessária na perceção de relações internas. Contudo é também importante analisar o relacionamento interparâmetros a fim de compreender possíveis relações na influência da instabilidade das vertentes.

Relativamente à capacidade de infiltração é de salientar o ponto “Carv2”. Localizado a montante de um deslizamento de maiores dimensões, possui a maior capacidade de infiltração (3.18cm/min no último minuto de experiência). A taxa de infiltração neste caso é equivalente às taxas obtidas em granitoides (valor médio de 2.95 cm/min no último minuto de experiência), o que significa que não há um impedimento na entrada de água no solo, que se faz de forma rápida. Por outro lado, o valor da condutividade hidráulica (k_{fs}) indicador de que a água circula, apresenta uma k_{fs} de 0.0002286 cm/s, o 2º valor mais elevado obtido em campo. Mesmo assim um valor muito baixo face à taxa de infiltração do solo obtida. O perfil de resistividade 1 evidência valores elevados de resistência elétrica próximo da superfície, o que indica a presença de caminhos preferências, que vão desaparecendo em profundidade. Isto pode explicar os elevados valores da capacidade de infiltração obtida. Quanto à textura do solo, podemos salientar que se enquadra na classe textural “cascalho-lodoso” com 40% de cascalho, 12% de areia e 49% de finos. De todas as amostras de solo recolhidas é a apresenta a maior percentagem de cascalho. Em termos hidrológicos pode representar um fluxo de escoamento interno rápido.

O ponto “Carv8” apresenta a 2º maior capacidade infiltração dos levantamentos efetuados. Localiza-se na convexidade na base da vertente. Por seu turno, a k_{fs} apresenta um valor de 0.0002016cm/s, um valor um pouco inferior ao “Carv2”. O terreno apresenta capacidades de infiltrações de acordo com a litologia em questão e com os valores de k_{fs} . O perfil de resistividade 6 apresenta-se como um perfil do solo aparentemente homogéneo, com o aumento dos valores de resistividade à medida que se caminha para a concavidade da vertente.

O ponto “Carv7” localizado na base em traçado côncavo apresenta uma taxa de infiltração de 0.238cm/min em 6min30s da experiência. Apresenta uma capacidade de infiltração relativamente baixa com uma infiltração de 1.5cm de água no solo. A k_f (0.002016cm/s) repetiu-se em 3 levantamentos efetuados. Portanto, o ponto “Carv7” assume valores relativamente homogêneos tendo em conta a litologia da área de estudo. Apresenta uma textura de lodo-cascalhento, com 34% de cascalho, 8% de areia e 58% de finos (lodo de acordo com a classe textural adotada). O perfil de resistividade associado (perfil 8) apresenta os valores mais elevados de resistividade obtida associados à presença de espaço poroso.

CAPÍTULO 4- MODELAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 MODELAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE PELO MODELO SHALSTAB

Procedeu-se à modelação baseada na metodologia SHALSTAB, considerando vários cenários de suscetibilidade. Recorde-se que foram ainda aplicados dois MDT's (cujas características foram já referidas), visando a avaliação da respetiva qualidade na modelação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente.

O SHALSTAB, como já foi referido, baseia-se num modelo de estabilidade e num modelo hidrológico. Apenas alguns parâmetros são introduzidos pelo investigador na modelação, de acordo com os levantamentos de campo efetuados, nomeadamente o ângulo de atrito interno (ϕ), a espessura do solo (z) e o peso específico do solo (p_s). Os vários cenários definidos distinguem-se pela variação dos parâmetros físicos introduzidos. Assim, foram aplicados quatro cenários de suscetibilidade (que designamos por A, B, C e D), sendo em cada um representadas as classes de suscetibilidade de acordo com o $\log Q/T$ (logaritmo do valor real), as áreas em percentagem de cada classe de suscetibilidade e as percentagens de área deslizada por classe (Dietrich & Montgomery, 1998, in TEIXEIRA, 2012).

A análise dos diferentes cenários (figuras seguintes) recorreu à elaboração de gráficos de frequências relativas, considerando as percentagens da área abrangida por cada classe. Face ao inventário realizado, foi igualmente efetuada uma análise de frequências entre os movimentos de vertente e as áreas correspondentes a cada classe de suscetibilidade.

A modelação abrangeu toda a área da quinta, devido à metodologia utilizada no cálculo das áreas contributivas. No entanto foi preferencialmente representada cartograficamente a área de vinha, dada a incidência geográfica do inventário realizado.

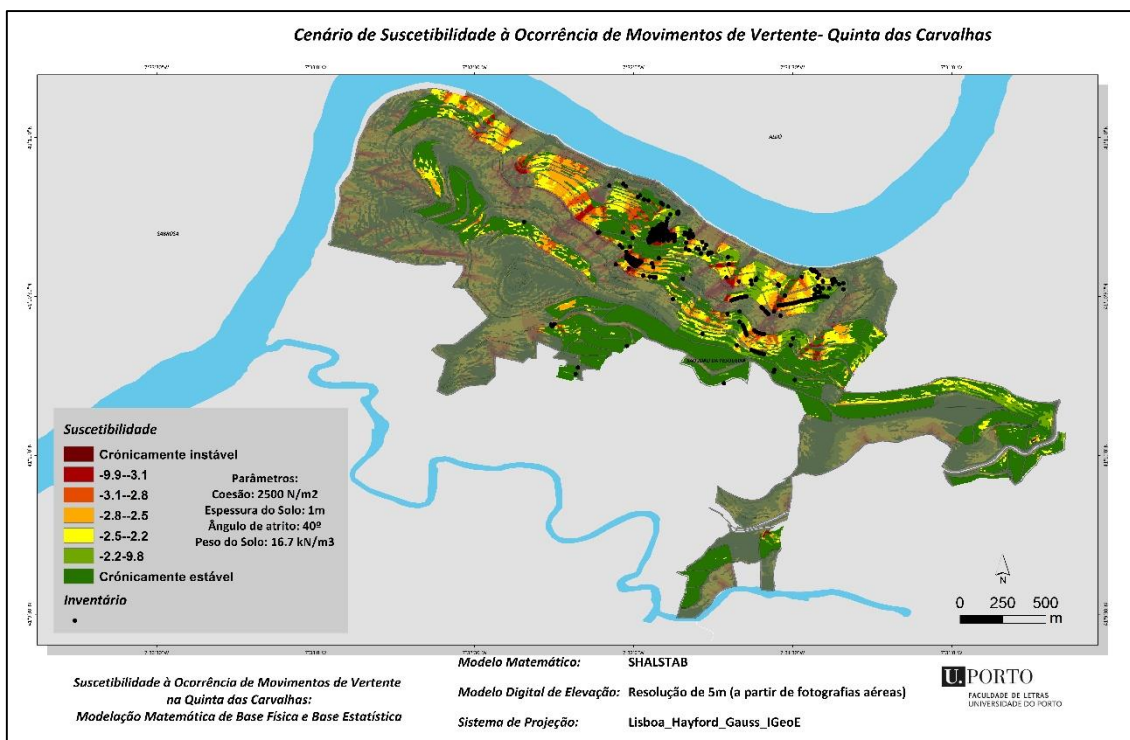


Figura 68- Mapa do Cenário A de suscetibilidade- MDE (A).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

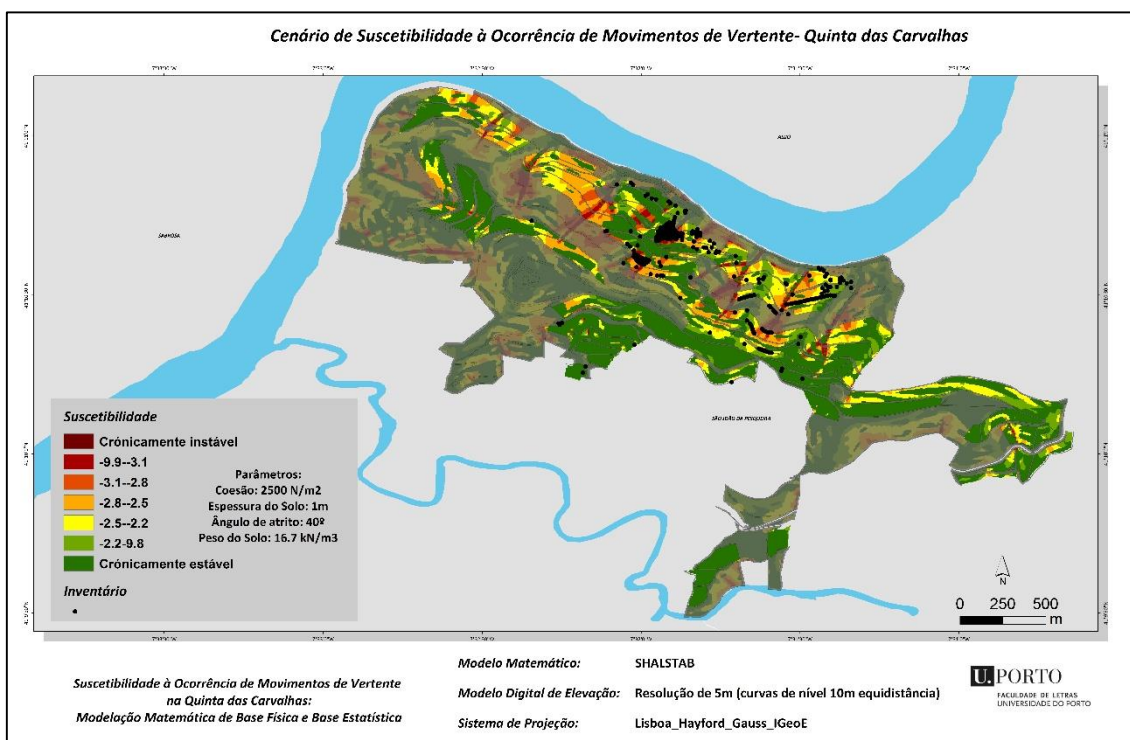


Figura 69- Mapa do Cenário A de suscetibilidade- MDE (B).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

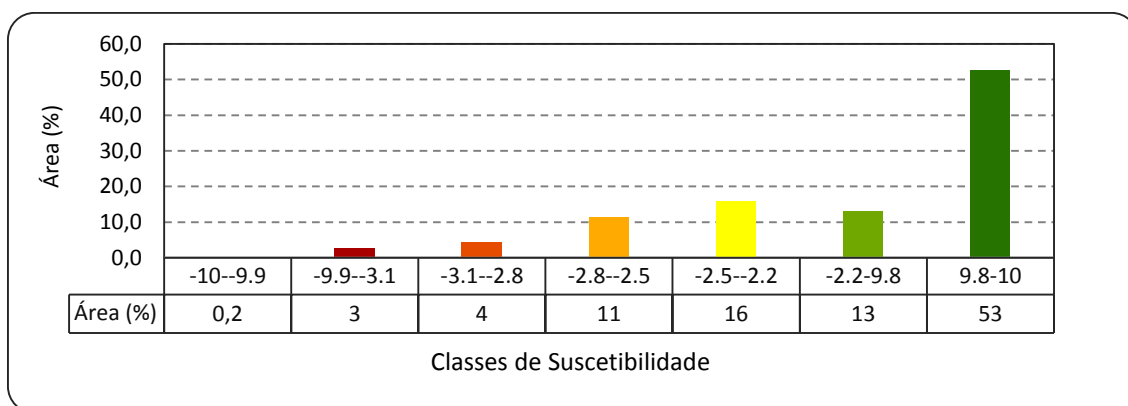


Figura 70- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário A- MDE (A).

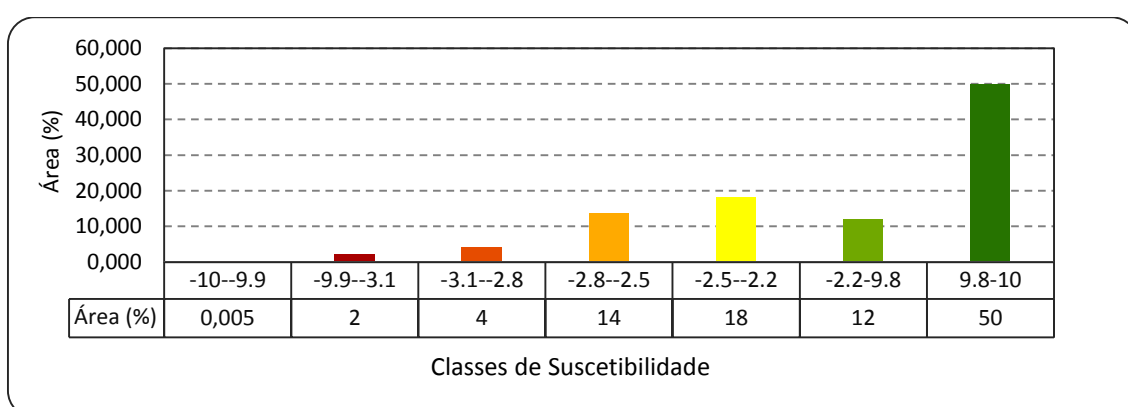


Figura 71- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário A- MDE (B).

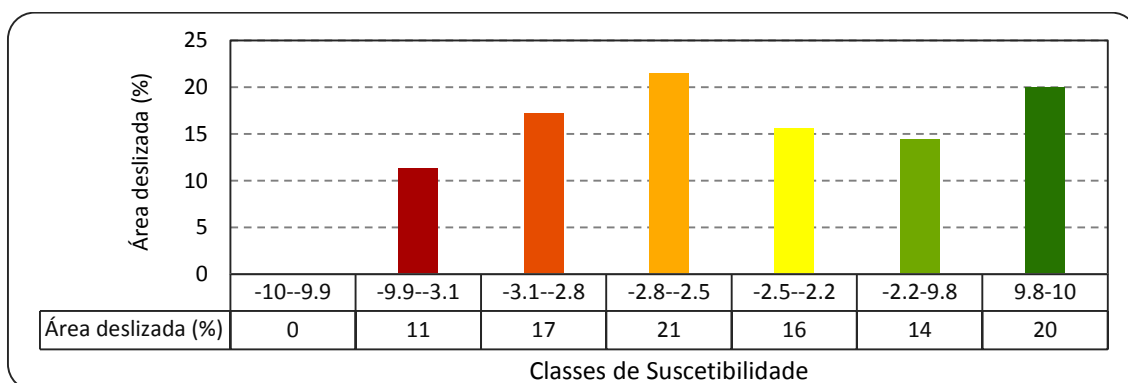


Figura 72- Área deslizada (%) por classe de suscetibilidade no cenário A- MDE (A).

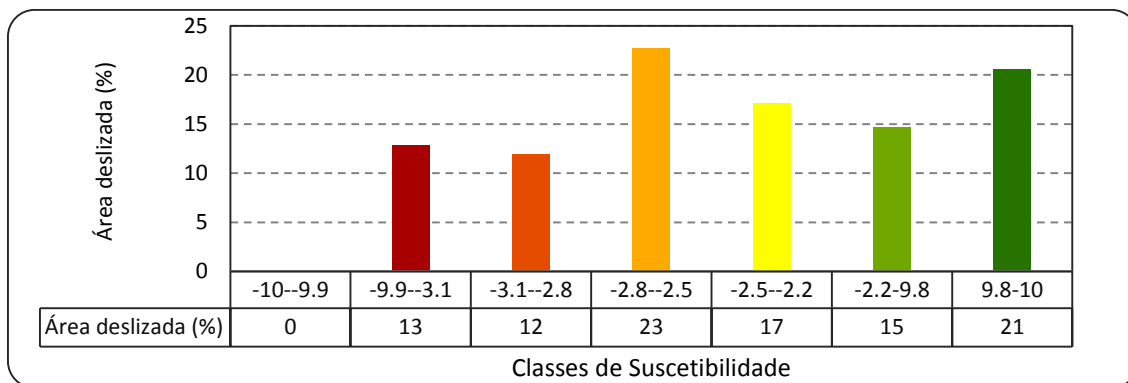


Figura 73- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário A- MDE (B).

Como já foi referido, o fator coesão (c') foi conseguido recorrendo à retroanálise. O ângulo de atrito interno (ϕ) é de 40° , tendo em conta o declive dos patamares (igualmente de 40°), portanto foi assumido que $\tan\phi = \tan\theta$. O peso específico do solo (ρ_s) de acordo com o levantamento efetuado é de 16.7 kN/m^3 . Quanto à espessura do solo (z) esta é variável e no cenário A (figura 68 e 69), assumiu-se de 1 metro. Por isso, a coesão corresponde a 2500 N/m^2 . De acordo com os parâmetros introduzidos no cenário A, verifica-se, em termos da percentagem de área abrangida por cada classe, que as consideradas estáveis compreendem uma área de 66% e as classes instáveis³² aproximadamente 18% (figura 70). A classe cronicamente instável representa apenas 0.2% da área total. Neste cenário mas com o MDE (B) (figura 71), os resultados não são muito diferentes: as classes de suscetibilidade consideradas instáveis contam com uma área de aproximadamente de 20% comparativamente com uma área de 62% de área considerada estável.

Quanto à área deslizada por classe (figura 72), é de salientar que na classe “cronicamente instável” ($\log Q/T$ -10- -9.9), não se observam registos de instabilidade. Pelo contrário, a classe que apresenta maior área deslizada é classe $\log (Q/T)$ -2.8- -2.5 com 21%. As classes estáveis (> -2.2) concentram 34% do total de área deslizada e as classes instáveis (< -2.5) apresentam 49% da área deslizada.

Na figura 73, que apresenta a área deslizada para o cenário A do MDE (B), 36% dos movimentos de vertente ocorreram em áreas classificadas como estáveis de acordo com os parâmetros utilizados.

³² São consideradas classes instáveis de suscetibilidade as classes $\log (Q/T)$ -10 - -2.5.

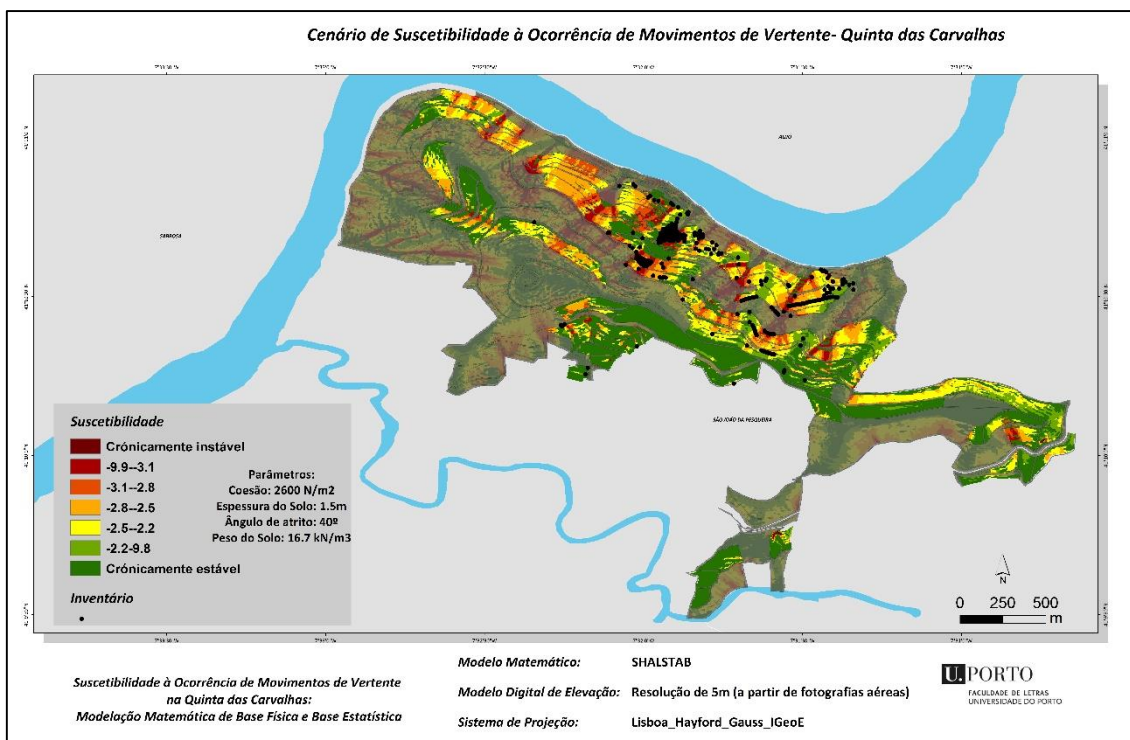


Figura 74- Mapa do cenário B de suscetibilidade- MDE (A).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

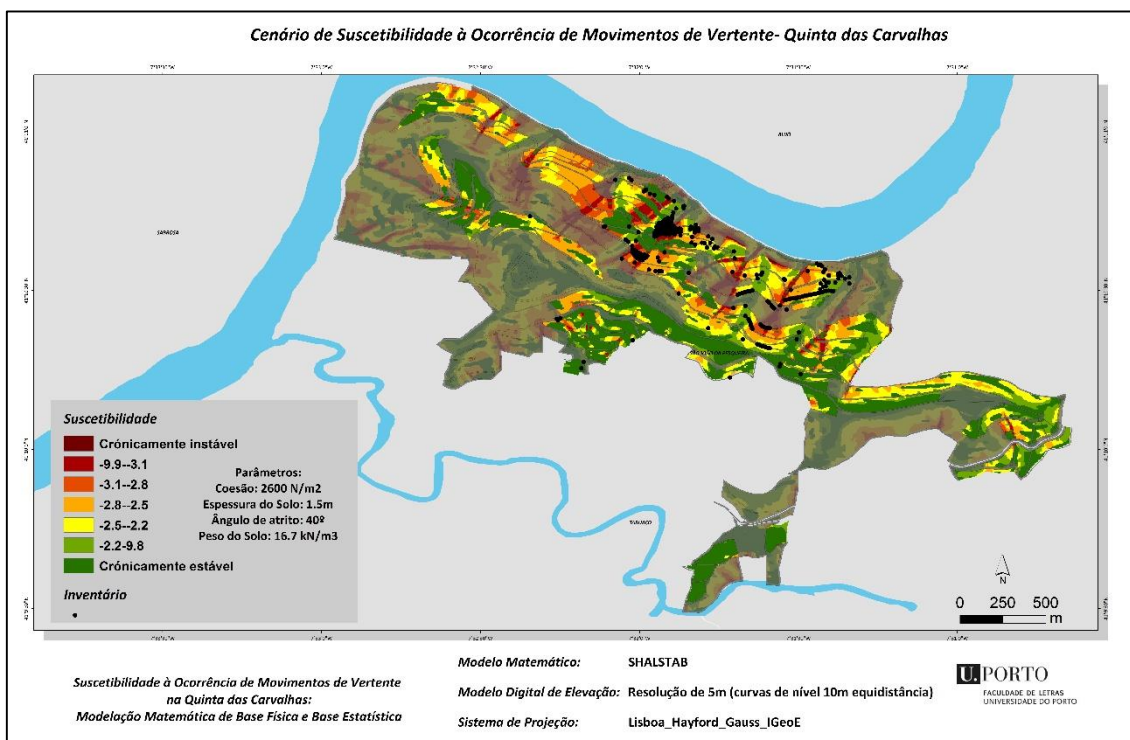


Figura 75- Mapa do cenário B de suscetibilidade – MDE (B).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

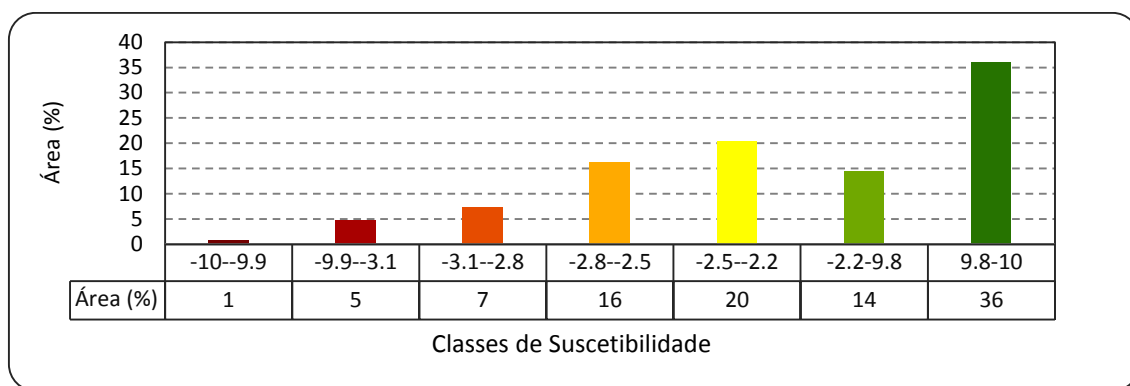


Figura 76- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário B-MDE (A).

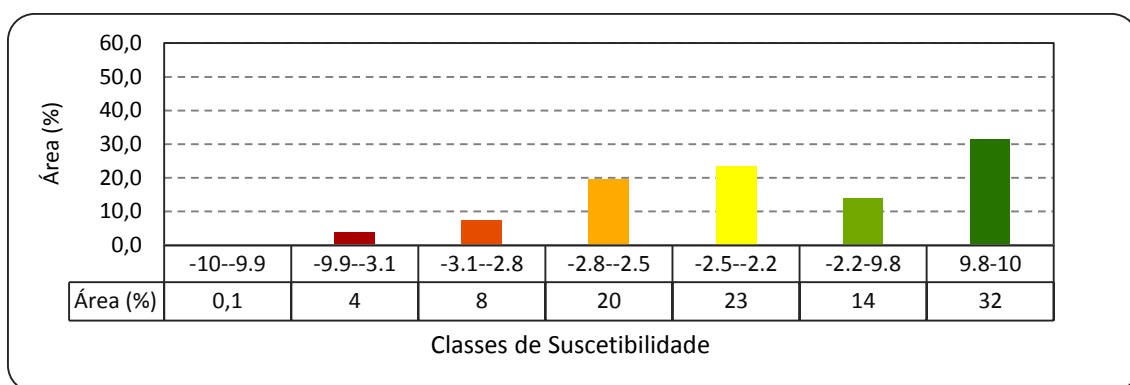


Figura 77- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário B- MDE (B).

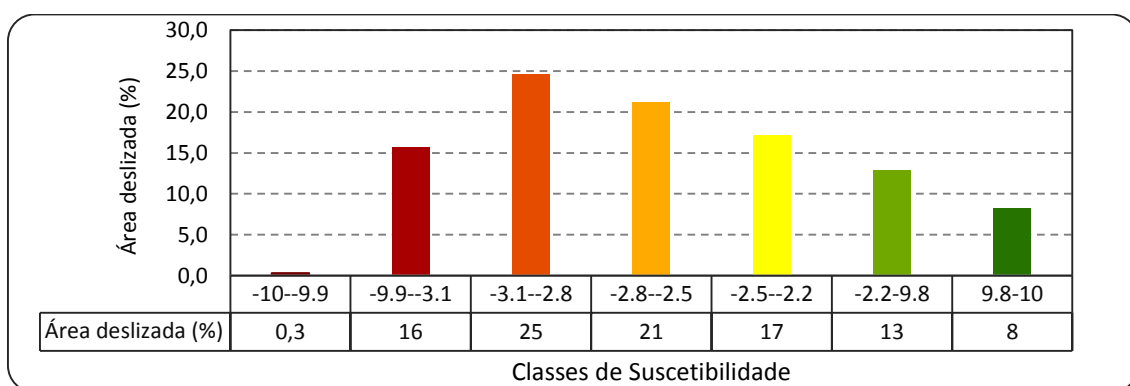


Figura 78- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário B- MDE (A).

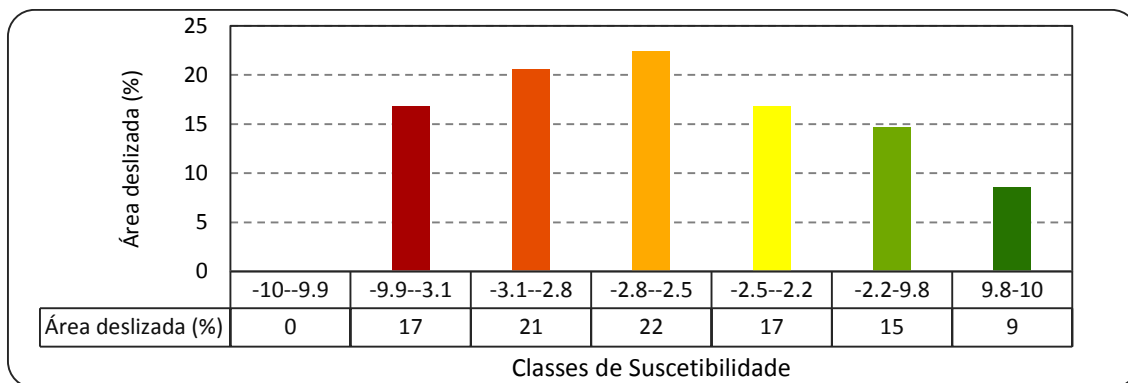


Figura 79- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário B- MDE (B).

No cenário B de suscetibilidade (figura 74 e 75), os parâmetros ângulo de atrito interno (ϕ) e peso do solo (p_s) permanecem iguais, variando apenas a espessura do solo (z) e a coesão (c'). A espessura do solo foi assumida como 1.5m, pelo que a coesão neste caso será de 2600 N/m².

Da leitura da figura 76, é de salientar que as classes consideradas instáveis aumentaram em termos de área para 29% do total, resultado da modificação do fator espessura do solo (z). A classe cronicamente instável aumentou de 0.2% para 1% do total da área.

O mesmo aumento se registou aplicando o MDE (B) (figura 77), com 32% das áreas consideradas instáveis, valor esse superior em 3% em relação ao MDE (A).

Em termos de área deslizada por classe (figura 78), é importante referir que a classe cronicamente instável conta com 0.3% de área deslizada, ou seja, esta classe é muito pouco representativa quer no cenário B, quer no cenário A (0%). No entanto, cerca de 62% das cicatrizes encontram-se nas classes instáveis. Apenas 21% da área deslizada se encontra na classe estável e cronicamente estável.

Pelo contrário no MDE (B) (figura 79), a classe log (Q/T) -2.8- -2.5 é a que apresenta maior percentagem de processos, com 22% em relação ao total. A classe cronicamente instável não apresenta nenhuma ocorrência de movimentos de vertente. Neste caso, as classes consideradas instáveis apresentam uma percentagem de deslizamentos de 60%, valor inferior em 2% comparativamente com o obtido com o MDE (A) (figura 77).

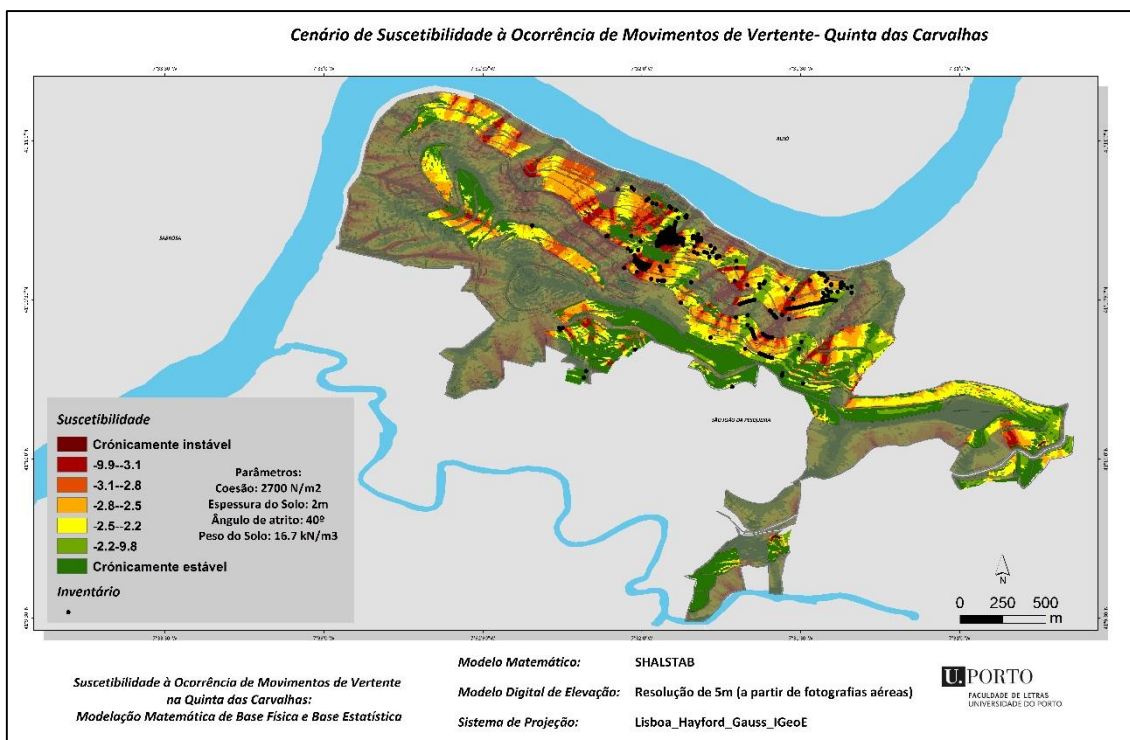


Figura 80- Mapa do cenário C de suscetibilidade – MDE (A).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

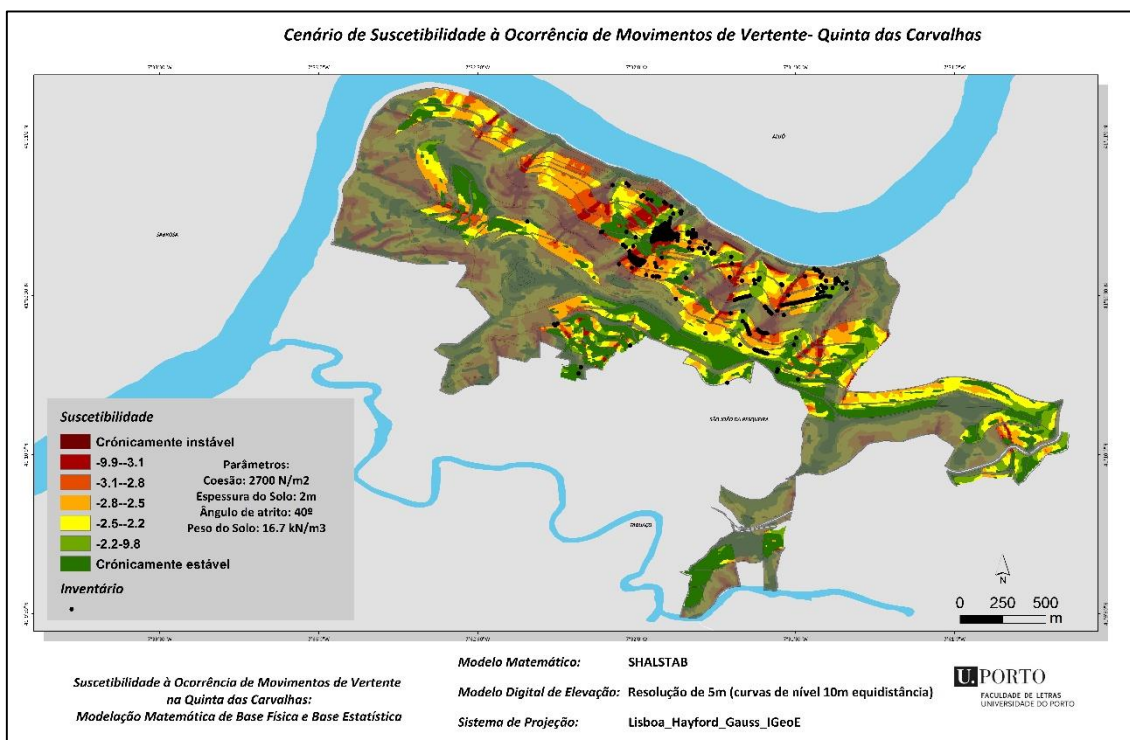


Figura 81- Mapa do cenário C de suscetibilidade – MDE (B).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

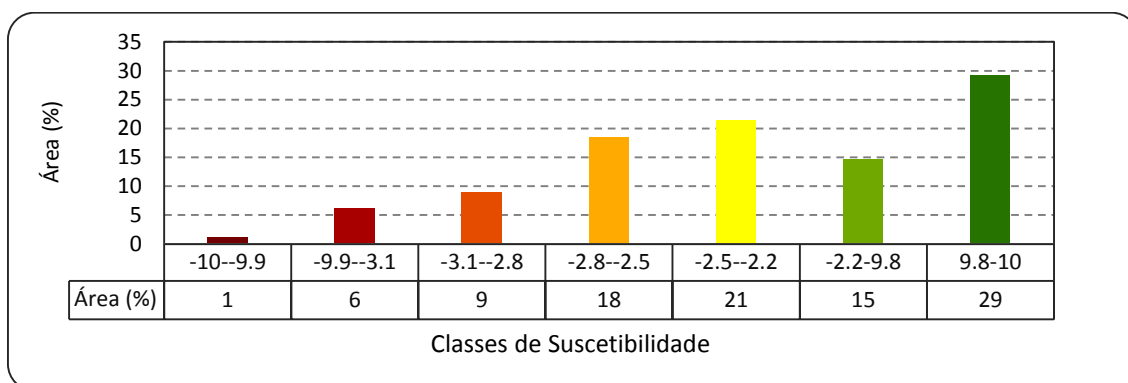


Figura 82- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário C- MDE (A).

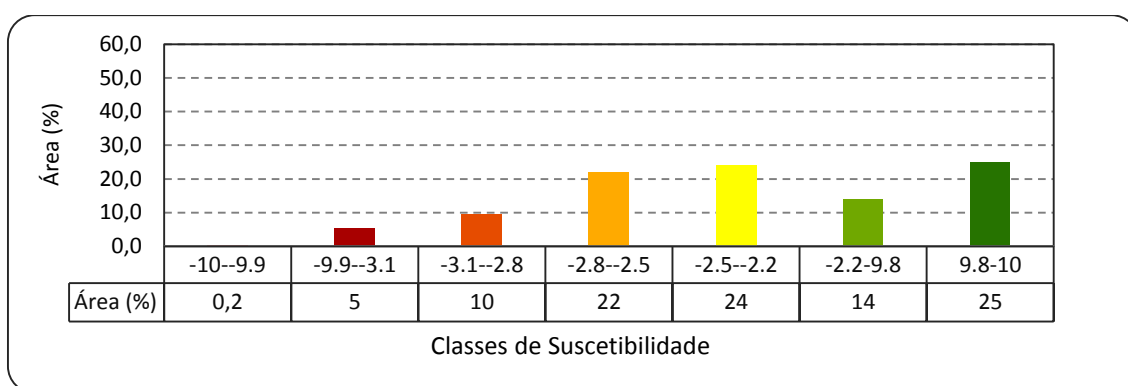


Figura 83- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário C- MDE (B).

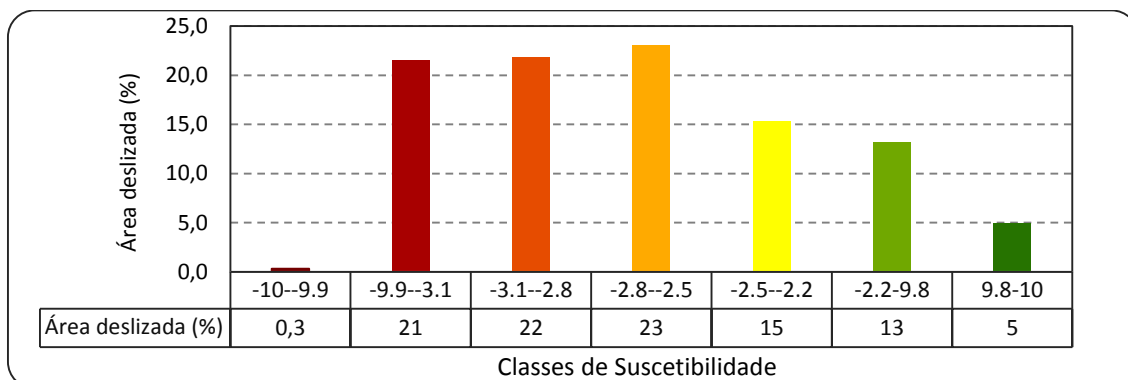


Figura 84- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário C- MDE (A).

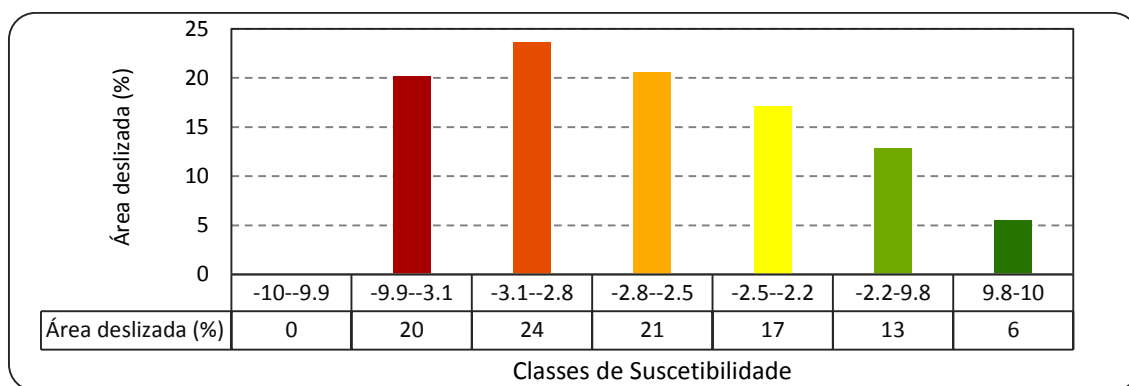


Figura 85- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no C – MDE (B).

No cenário C (figura 80 e 81) foi considerada uma espessura do solo de 2m e uma coesão de 2700 N/m², mantendo-se os restantes parâmetros.

Com o aumento da espessura do solo as classes instáveis representam 34% da área total (figura 82), o que revela um acréscimo comparativamente com o cenário B, que contava apenas com 29% (figura 76). Portanto o aumento da espessura do solo leva ao aumento das classes consideradas instáveis. As áreas instáveis concentram-se essencialmente nas áreas de convergência de fluxo (figura 80), enquanto as estáveis se localizam nas estradas de acesso à quinta, áreas de fracos declives e interflúvios. No cenário C do MDE (B) (figura 83), as áreas instáveis representam uma área de 37%, valor superior em 3% comparativamente com o MDE (A) (figura 82).

Em termos de área deslizada (figura 84) as ocorrências localizam-se preferencialmente nas classes instáveis (66% da área deslizada). No MDE (B), 65% das ocorrências localizam-se nas áreas consideradas instáveis, valores que se mostram muito semelhantes independentemente do MDE utilizado.

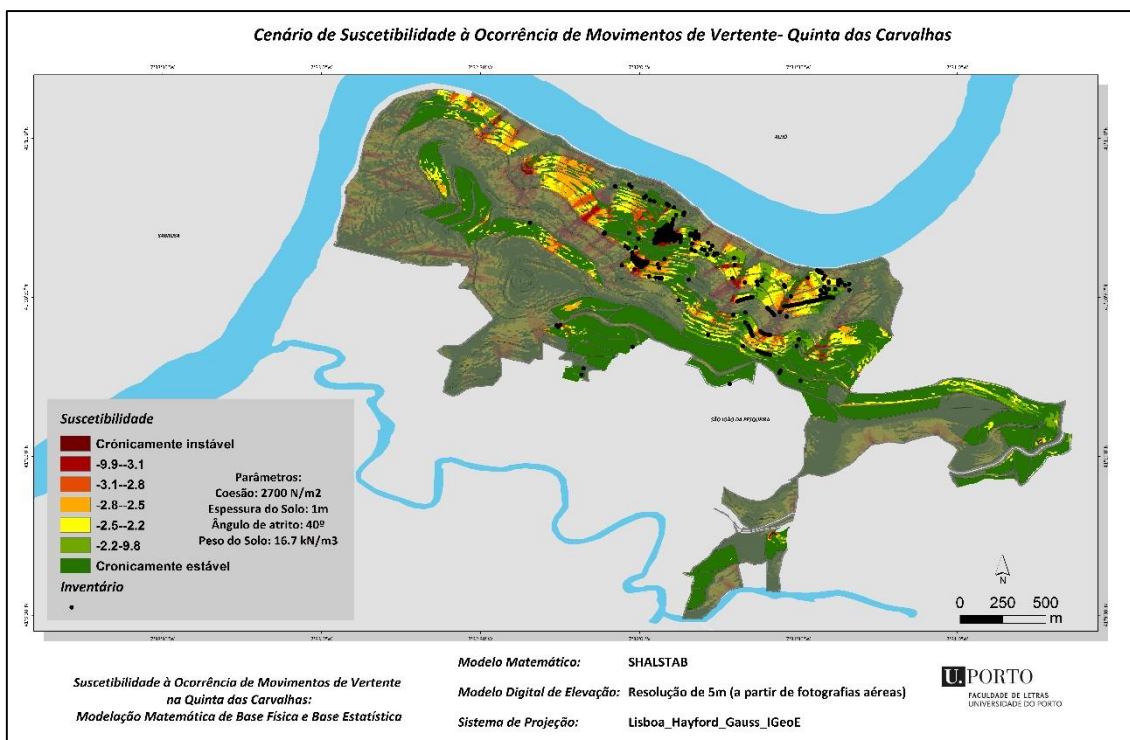


Figura 86- Mapa do Cenário D de suscetibilidade- MDE (A).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

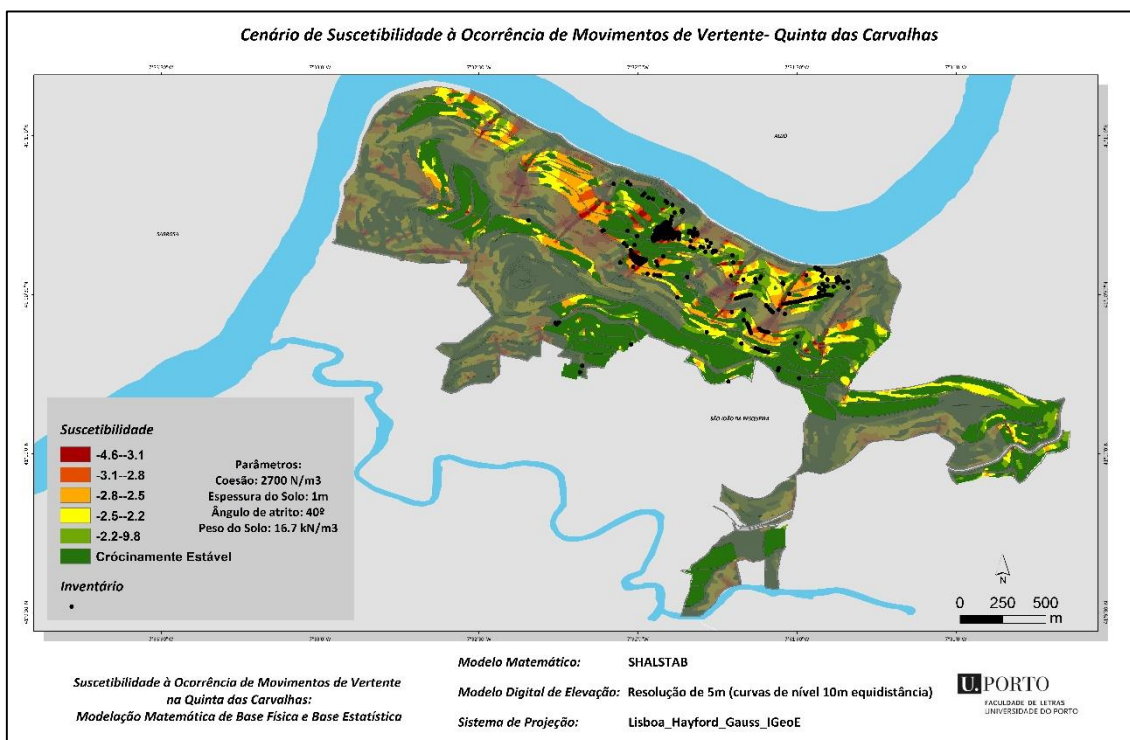


Figura 87- Mapa do cenário D de suscetibilidade- MDE (B).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

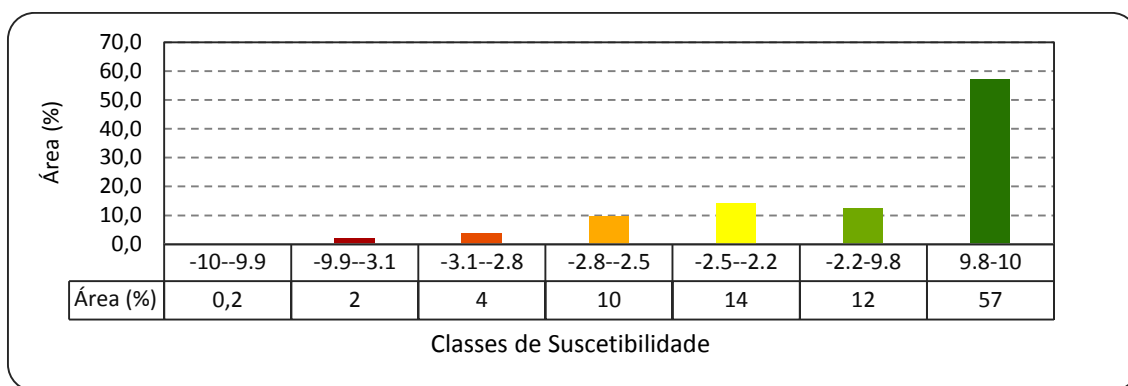


Figura 88- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário D- MDE (A).

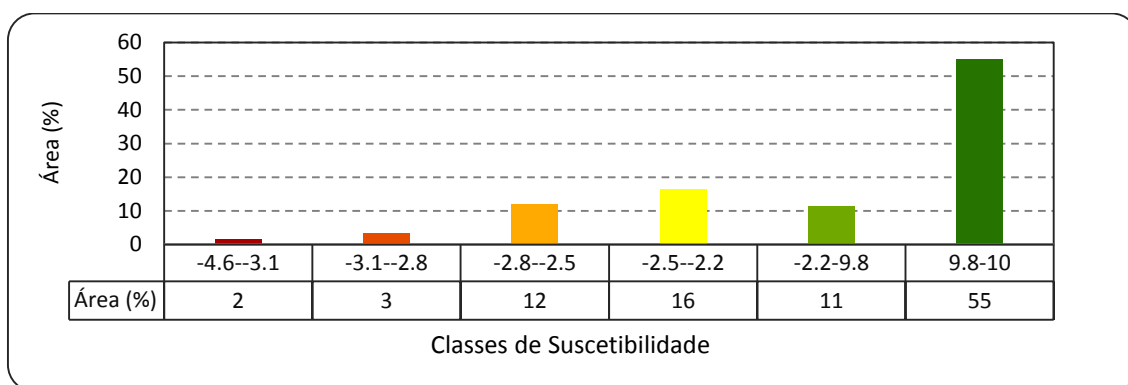


Figura 89- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário D- MDE (B).

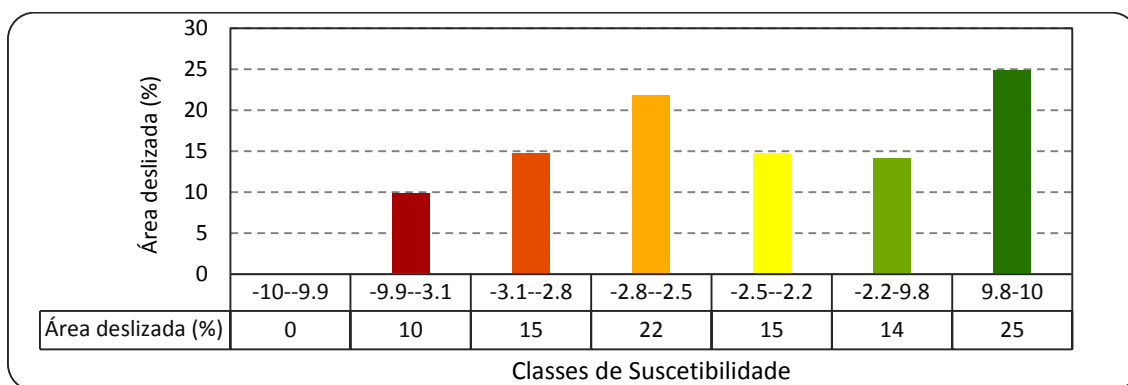


Figura 90- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário D- MDE (A).

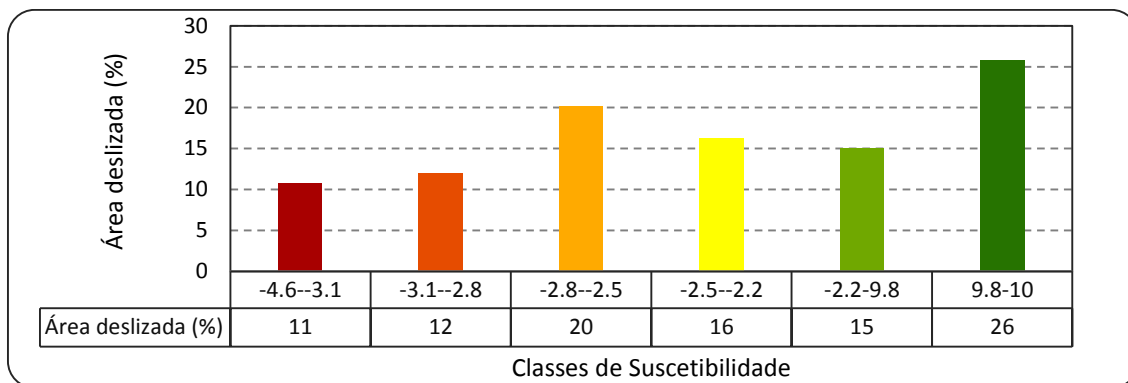


Figura 91- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário D- MDE (B).

No cenário D (figuras 86 e 87), a espessura do solo é igual à do cenário A (1 metro), modificando-se apenas o parâmetro c' que passa de 2500 N/m^2 no cenário A para 2700 N/m^2 no cenário D. Neste caso, pretende-se compreender o efeito da coesão.

Tendo em conta os parâmetros utilizados, no MDE (A) (figura 88) a percentagem de área instável é de cerca de 16%, sendo claro o seu decréscimo relativamente ao cenário C (34%). As classes instáveis voltam a diminuir em termos de área em relação ao cenário B e C, em associação com a diminuição da espessura do solo ter diminuído. Portanto, diminuindo (z) as áreas instáveis também diminuem. No entanto, também foi clara neste caso, a influência de c' .

O cenário A do MDE (A) (figura 70) apresentava uma percentagem de áreas instáveis de 18% comparativamente com os 16% do cenário D. Ou seja, o aumento de c' diminui as áreas consideradas instáveis. Tal fato é perceptível e compreensível pelo conceito de coesão³³.

Por outro lado, o MDE (B) (figura 89) apresenta uma percentagem de áreas consideradas instáveis de 17%. Valores também inferiores, se comparados com os cenários B e C elaborados a partir do MDE (B). Comparativamente com o cenário A, que apresenta o mesmo valor de espessura de solo excetuando-se a coesão (2500 N/m^2), apresenta uma percentagem de área instável de 20% (figura 71). Neste caso a relação estabelecida anteriormente é novamente verificada: o aumento de c' diminui as áreas consideradas instáveis. De salientar que no MDE (B) do cenário D não existe a classe cronicamente instável (figura 89).

Relativamente à área deslizada por classe, no cenário D do MDE (A) (figura 90) verifica-se que 39% dos movimentos se localizam nas classes consideradas estáveis e 47% nas instáveis. Quanto ao número de ocorrências, no MDE (B) (figura 91) a classe com maior percentagem de movimentos é a considerada estável, com 26% de acordo com o cenário C de suscetibilidade. Neste caso as áreas consideradas instáveis abrangem 43%.

³³ Ver capítulo 3- Parâmetros Físicos – Coesão do Solo.

Em suma, nos vários cenários aplicados, verifica-se que um aumento da espessura do solo parece implicar igualmente um acréscimo das áreas classificadas como instáveis. Por outro lado, o aumento da coesão diminui as áreas consideradas instáveis. Em todo o caso, as classes mais instáveis concentram-se em áreas de maior declive, onde os valores da área de contribuição são visivelmente mais elevadas, o índice topográfico de humidade também apresenta valores elevados e ainda alguma relação com os sectores côncavos da vertente.

4.1.1 Validação dos cenários

O processo de validação tem como objetivo a escolha do modelo com melhor capacidade preditiva e que melhor reflete a realidade estudada. A validação foi feita em relação aos 4 cenários de suscetibilidade e para os dois MDE's.

Para a validação do SHALSTAB foi utilizado o inventário completo, uma vez que na modelação matemática o inventário não é incorporado. Por esse facto, não há a necessidade da repartição do inventário.

Tabela 8- Resultados da validação do SHALSTAB- MDE (A).

Modelo SHALSTAB		TPR	FPR	ACC	PPV	TPR/FPR
Cenário A	$c' - 2500 \text{ N/m}^2$; $Z - 1\text{m}$; $p_s - 16,7 \text{ kN/m}^3$; $\phi - 40^\circ$	0,656	0,343	0,657	0,00021	1,915
Cenário B	$c' - 2600 \text{ N/m}^2$; $Z - 1,5\text{m}$; $p_s - 16,7 \text{ kN/m}^3$; $\phi - 40^\circ$	0,788	0,495	0,505	0,00018	1,591
Cenário C	$c' - 2700 \text{ N/m}^2$; $Z - 2\text{m}$; $p_s - 16,7 \text{ kN/m}^3$; $\phi - 40^\circ$	0,819	0,561	0,439	0,00016	1,459
Cenário D	$c' - 2700 \text{ N/m}^2$; $Z - 1\text{m}$; $p_s - 16,7 \text{ kN/m}^3$; $\phi - 40^\circ$	0,610	0,303	0,697	0,00022	2,016

Da análise da tabela 8, é de salientar que relativamente à taxa de verdadeiros positivos (TPR), ou seja que é classificado como suscetível e na realidade ocorreram movimentos de vertente, o cenário que apresenta melhores resultados é o cenário C. No cenário C, é considerada uma espessura do solo de 2m e coesão de 2700 N/m^2 . Pelo contrário, o pior cenário neste grupo é o cenário D, onde foi considerada uma espessura de solo de apenas 1m. Quanto à taxa de falsos positivos (FPR), é o cenário D que apresenta melhores resultados (30%). Este grupo representa as áreas classificadas como suscetíveis mas em que não foram registadas ocorrências, pelo que um valor inferior representa uma melhor validação. O cenário C (que representa uma melhor validação na TPR) neste caso apresenta uma taxa de falsos positivos (FPR) de 56%.

A taxa de fiabilidade (ACC) apresenta melhores resultados no cenário D com 69.7%. De referir que o cenário C, que se apresenta com melhor cenário na TPR, neste caso apresenta 44% na taxa de fiabilidade.

Em relação à precisão (PPV), é novamente o cenário D que detém os melhores resultados (0.022%).

De uma forma geral, apesar do cenário D apresentar uma taxa de verdadeiros positivos (TPR) mais reduzida em relação aos restantes cenários, é o que evidencia melhores resultados nos restantes grupos de validação. Por outro lado, o cenário C apresenta uma excelente taxa de verdadeiros positivos (TPR) e nos restantes grupos apresenta piores resultados.

Tabela 9- Resultados da validação do SHALSTAB- MDE (B).

Modelo SHALSTAB		TPR	FPR	ACC	PPV	TPR/FPR
Cenário A	$c' - 2500 \text{ N/m}^2$; $Z - 1\text{m}$; $p_s - 16,7$ kN/m^3 ; $\phi - 40^\circ$	0,647	0,382	0,618	0,00019	1,695
Cenário B	$c' - 2600 \text{ N/m}^2$; $Z - 1,5\text{m}$; $p_s - 16,7$ kN/m^3 ; $\phi - 40^\circ$	0,767	0,546	0,454	0,00016	1,405
Cenário C	$c' - 2700 \text{ N/m}^2$; $Z - 2\text{m}$; $p_s - 16,7$ kN/m^3 ; $\phi - 40^\circ$	0,816	0,612	0,388	0,00015	1,333
Cenário D	$c' - 2700 \text{ N/m}^2$; $Z - 1\text{m}$; $p_s - 16,7$ kN/m^3 ; $\phi - 40^\circ$	0,592	0,337	0,663	0,00019	1,757

A tabela 9 apresenta os resultados obtidos da validação para os 4 cenários, no entanto tendo em conta o MDE (B). Portanto, neste caso serão também analisadas as diferenças entre os cenários com os diferentes MDE's.

De acordo com os resultados da tabela 9, a TPR com melhor validação remete para o cenário C (81.6%), o que já acontecia no caso anterior e com valores praticamente iguais (81.9%). O pior cenário ainda relativo à TPR remete para o cenário D, com 59.2%, o que já tinha acontecido para a validação do MDE A.

Quanto à taxa dos falsos positivos (FPR) o melhor cenário é o D, com 33.7%, sendo o pior cenário o C, com 61.2%. Portanto, neste caso verifica-se uma relação inversa: o melhor cenário na TPR evidencia-se o pior cenário em FRP e o pior cenário na TPR mostra-se o melhor na FRP. Em comparação com a validação da tabela 8, o melhor cenário na FPR foi o cenário D (30%) e o mesmo aconteceu na tabela 9, no entanto 3% superior, o que neste caso reflete pior validação.

Quanto à fiabilidade (ACC) o melhor cenário é novamente o cenário D, com 66.3 % e o pior cenário o C. Isto evidencia novamente uma relação inversa com a TPR. O cenário D da tabela

8 também apresenta o melhor resultado (69.7%), valor esse superior em relação ao cenário C da tabela 9.

Em relação à precisão (PPV), o cenário A e D apresentam uma melhor validação e novamente o cenário C a apresentar os piores resultados.

Em suma, na análise da validação da tabela 9, o cenário D apresenta melhores resultados em todos os grupos de validação, excetuando-se no TPR que apresenta a pior validação. O cenário D apresenta $c' = 2700 \text{ N/m}^2$ e z de 1 m. Valores mais baixos de z evidenciam boas validações em FPR, ACC e PPV. Pelo contrário valores mais elevados de z repercutem-se em validações boas da TPR.

De forma geral, o melhor cenário é o D destacando-se o MDE (A). Portanto, apesar dos cenários serem iguais, é de notar que as diferenças existentes devem-se ao MDE utilizado. O MDE (A), com resolução de 5m elaborado a partir de fotografias aéreas de 50cm de resolução, apresenta melhores resultados comparativamente com o MDE de igual resolução mas realizado a partir de curvas de nível de 10m de equidistância.

O SHALSTAB apresenta melhores resultados no MDE (A) (relação TPR/FPR de 2.016), pelo facto do processamento dos algoritmos introduzidos para a modelação apontar para um melhor desempenho no MDE (A).

Apesar das diferenças entre os MDE utilizados e dos cenários aplicados, de acordo com FAWCETT (2006) considera-se um modelo de predição aceitável quando TPR/FPR é >1 , o que se verifica em todos os cenários das tabelas 8 e 9.

4.2 MODELAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE PELO VALOR INFORMATIVO

A modelação da base estatística pelo Valor Informativo (VI) foi de igual modo realizada com os dois MDE's, recorrendo-se à utilização das seguintes variáveis: os declives, a orientação das vertentes, o uso do solo, as áreas contributivas, o índice topográfico de humidade e a curvatura das vertentes. Foram escolhidas as variáveis acima³⁴ pelo fato de melhor explicarem a instabilidade ocorrida, mas também pela variabilidade espacial conseguida para a escala de análise utilizada (grande escala). Foram também definidas porque vão ao encontro dos parâmetros incorporados na modelação matemática.

Cada mapa dos vários fatores condicionantes foi exportado para 1m de resolução, para tornar possível a criação da *Tabulate Area*. O inventário realizado, pelos motivos já referidos³⁵,

³⁴ Capítulo 3-Cartografia dos Fatores Condicionantes.

³⁵ Capítulo 3- Materiais e Métodos- Inventário.

foi cartografado por pontos e não por áreas. Por esse fato os pontos foram convertidos em *raster* com 1m de resolução, possuindo assim uma área de 1m².

Para a modelação e validação da suscetibilidade pelo VI, dividiu-se o inventário realizado em 2 grupos aleatórios: o 'grupo de treino' e o 'grupo de teste'. Na modelação foi utilizado o grupo de treino, que corresponde a 50% do total da amostra, ou seja 163 pontos. No entanto, em termos cartográficos foi utilizado o inventário completo a fim de verificar a incidência espacial tendo em conta os diferentes cenários de suscetibilidade.

A modelação do VI baseado no MDE (A) resultou na tabela 10. Valores negativos de VI indicam que determinado parâmetro não influencia o desenvolvimento de instabilidade geomorfológica. Valores de VI positivos são indicadores de uma relação entre a variável e as ocorrências de movimentos de vertente, sendo que quanto maior o valor, maior essa relação causa-efeito (Yan, 1988, in ZÊZERE, 1997b).

No caso do fator condicionante 'declives', verifica-se que apenas as classes superiores a 30º possuem relação com as ocorrências, o mesmo ocorrendo quanto aos *scores* deste parâmetro mas derivados do MDE (B) (tabela 11).

No que diz respeito às áreas contributivas (do MDE A), as classes que influenciam a instabilidade são as classes 200-2000m² e > a 4000m². Na modelação com o MDE (B) as classes 200-1000m² e > 4000m² são as que apresentam maior relação com a ocorrência de movimentos de vertente.

No índice topográfico de humidade do MDE (A), apenas a 3ª classe possui uma relação direta com a instabilidade. Pelo contrário, na tabela 11 (MDE B) o índice topográfico de humidade apresenta valores positivos nas classes 3 e 4.

A orientação das vertentes a Norte, Nordeste e Este possuem valores positivos, pelo que significa uma relação direta entre a variável e as ocorrências de instabilidade em ambos os *scores* obtidos para a modelação a partir do MDE (A) e do MDE (B).

Quanto à curvatura das vertentes (MDE A), verifica-se uma relação direta no traçado retilíneo e côncavo. Pelo contrário o MDE (B) apenas indica influência no traçado côncavo.

Relativamente ao uso do solo, apenas a vinha exerce influência, como seria de esperar em ambas as modelações.

Tabela 10- Scores do Valor Informativo- MDE (A).

Mapa Condicionante	Código	Classe	Valor Informativo
<u>Declives</u>	1	<15	-2,660551572
	2	20	-1,700806744
	3	25	-1,250836495
	4	30	-0,212524396
	5	35	0,621766522
	6	40	0,972770237
	7	>40	0,193523162
<u>Áreas Contributivas</u>	1	<25	-0,773628132
	2	25-50	-1,051030946
	3	50-100	-0,465944986
	4	100-200	-0,043755369
	5	200-500	0,839259518
	6	500-1000	1,090639151
	7	1000-2000	0,437681462
	8	2000-4000	-0,394779331
	9	>4000	0,173732411
<u>Índice topográfico de humidade</u>	1	2,05 - 4,39	-0,600013638
	2	4,39 - 4,95	-0,089946499
	3	4,95 - 5,46	0,263435955
	4	5,46 - 6,20	-0,183023274
	5	6,20 - 9,61	-1,174441442
<u>Orientação das Vertentes</u>	2	N	0,514648394
	3	NE	0,441069928
	4	E	1,502302327
	5	SE	-2,771414739
	6	S	-2,989967106
	7	SW	-2,672023619
	8	W	-2,99
	9	NW	-2,531833842
<u>Curvatura das Vertentes</u>	1	Côncavo	0,074425194
	2	Retilíneo	0,008925636
	3	Convexo	-0,083664733
<u>Uso do solo</u>	1	Caminhos	-0,09400576
	2	Construções	-2,92
	3	Mato	-2,900798394
	4	Olival	-2,409940116
	5	Olival e mato	-2,92
	6	Outros	-2,92
	7	Taludes e mortórios	-2,92
	8	Vinha	0,822743253

Tabela 11- Scores do Valor Informativo- MDE (B).

Mapa Condicionante	Código	Classe	Valor Informativo
<u>Declives</u>	1	<15	-1,4
	2	20	-1,309470748
	3	25	-0,931907011
	4	30	-0,275604675
	5	35	0,206839615
	6	40	1,089173331
	7	>40	1,300395927
<u>Áreas Contributivas</u>	1	<25	-1,582092486
	2	25-50	-0,357766743
	3	50-100	-0,286997844
	4	100-200	-0,409674589
	5	200-500	0,891500777
	6	500-1000	1,262430948
	7	1000-2000	-0,688654483
	8	2000-4000	-1,6
	9	>4000	0,067962272
<u>Índice topográfico de humidade</u>	1	2,05 - 4,39	-0,072116176
	2	4,39 - 4,95	-0,366475573
	3	4,95 - 5,46	0,217228178
	4	5,46 - 6,20	0,733682758
	5	6,20 - 9,61	-0,631928501
<u>Orientação das Vertentes</u>	2	N	0,383335105
	3	NE	0,469358898
	4	E	1,50683529
	5	SE	-2,793660481
	6	S	-2,932309883
	7	SW	-2,95
	8	W	-2,870905037
	9	NW	-1,378110253
<u>Curvatura das Vertentes</u>	1	Côncavo	0,532975258
	2	Retilíneo	-0,096322576
	3	Convexo	-0,509071177
<u>Uso do solo</u>	1	Caminhos	-0,09400576
	2	Construções	-2,95
	3	Mato	-2,900798394
	4	Olival	-2,409940116
	5	Olival e mato	-2,95
	6	Outros	-2,95
	7	Taludes e mortórios	-2,95
	8	Vinha	0,822743253

Mas as observações anteriores, relacionam-se com a metodologia de classificação do mapa final de suscetibilidade. Assim, foram considerados 2 cenários, quer para o MDE (A) quer para o MDE (B), tendo em conta diferentes métodos de classificação.

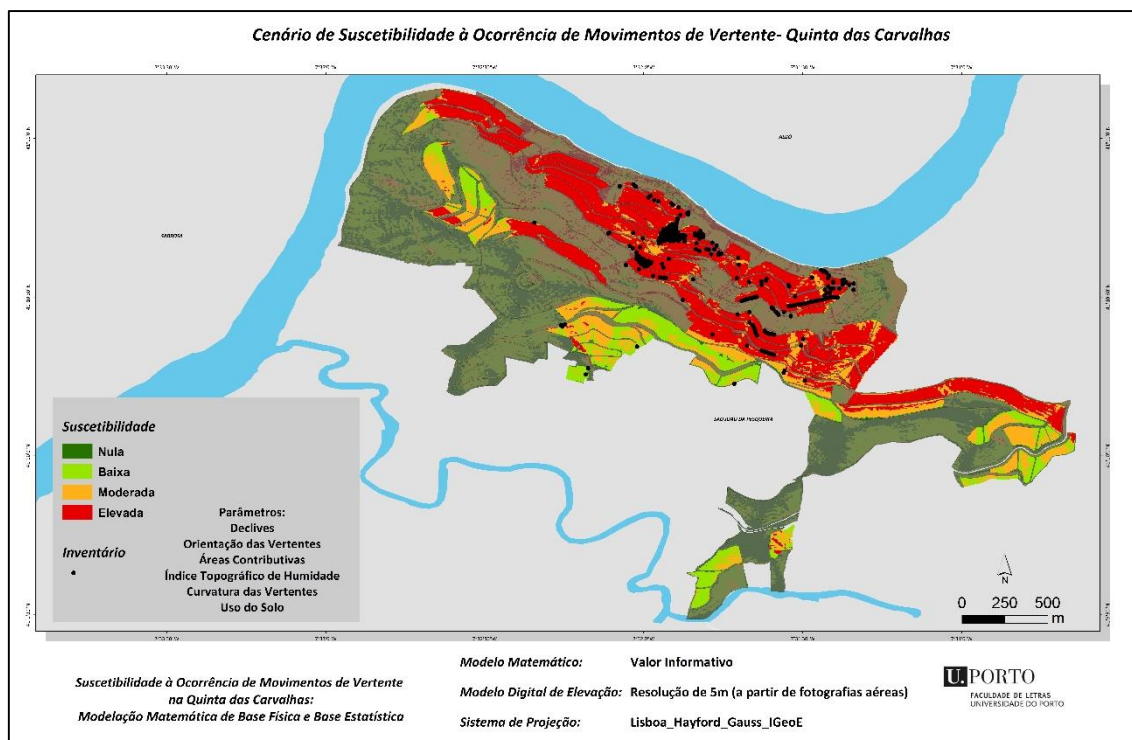


Figura 92- Cenário 1 de suscetibilidade. Classificação a partir das quebras naturais – MDE (A).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

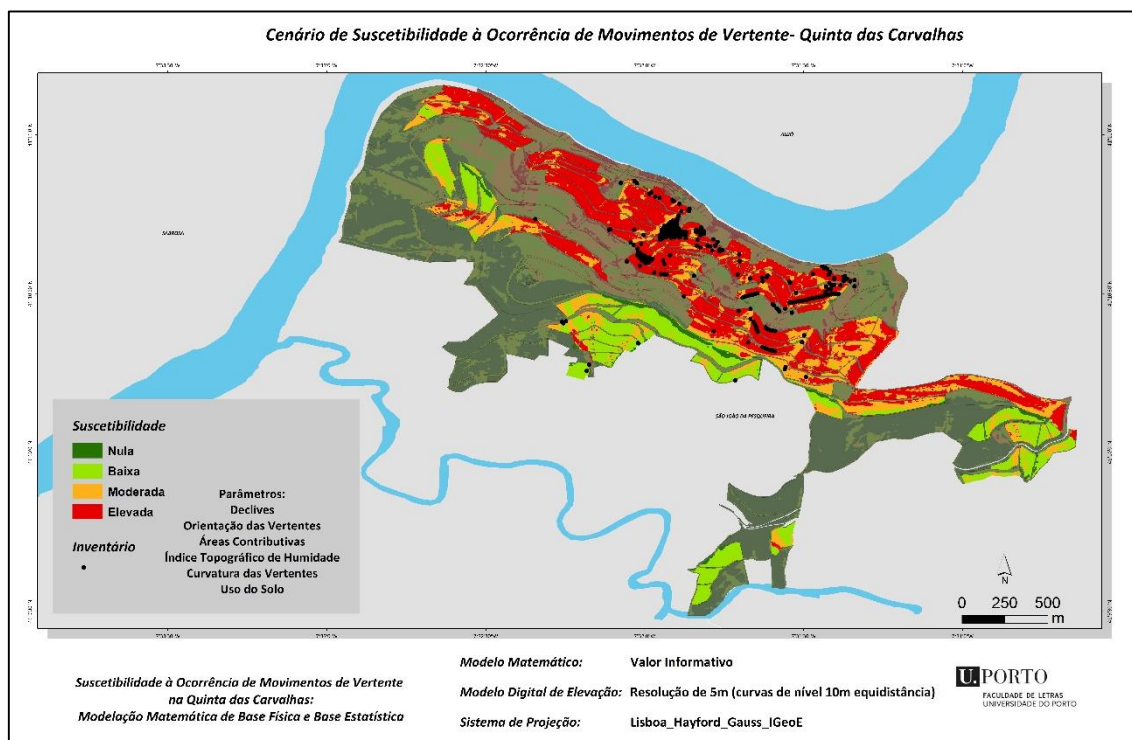


Figura 93- Cenário 1 de suscetibilidade. Classificação a partir das quebras naturais – MDE (B).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

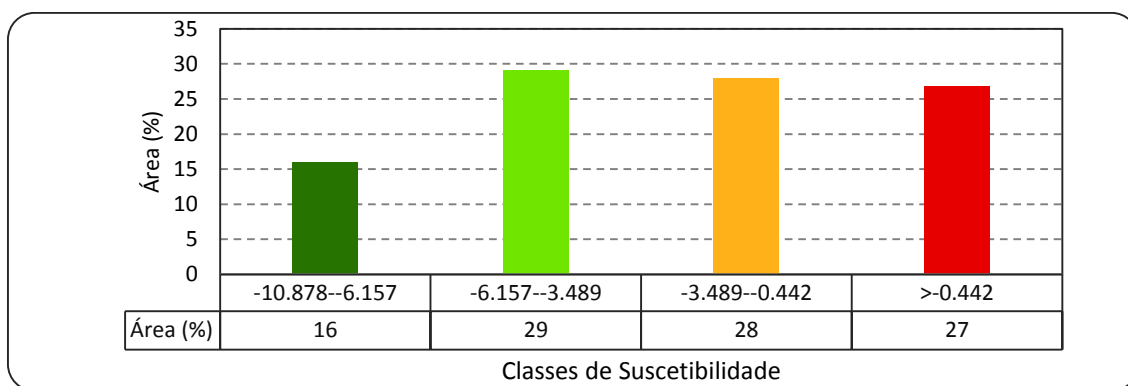


Figura 94- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário 1- MDE (A).

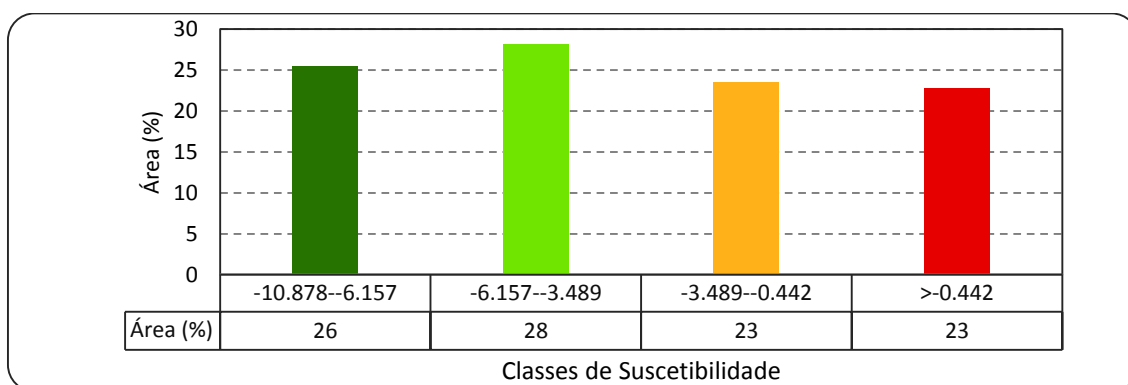


Figura 95- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário 1- MDE (B).

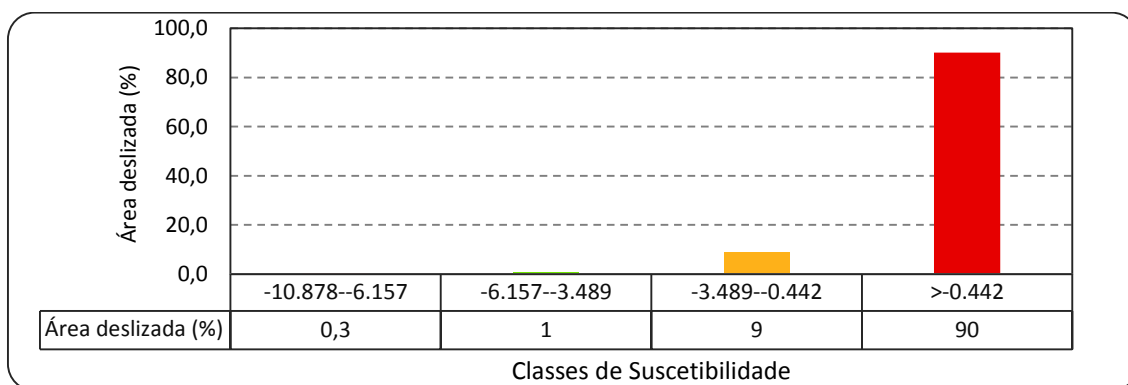


Figura 96- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário 1- MDE (A).

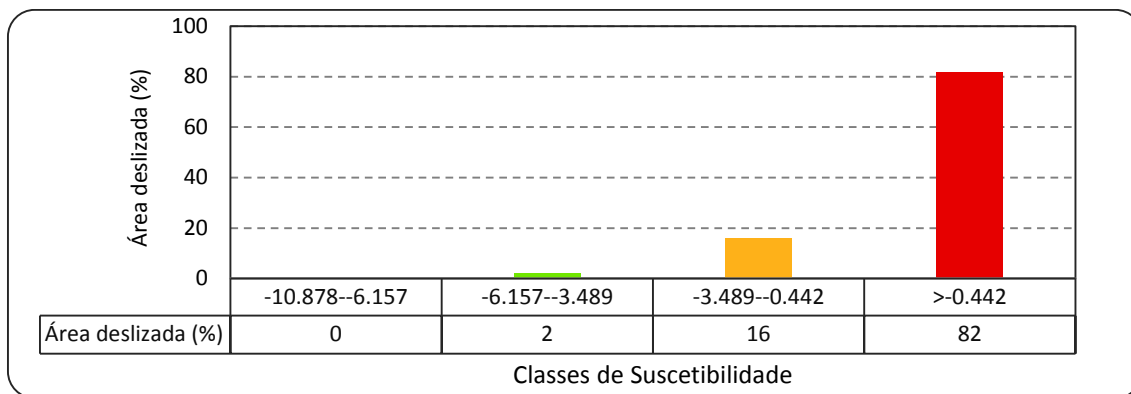


Figura 97- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário 1- MDE (B).

As figuras 92 e 93 representam o cenário 1 de suscetibilidade, para os MDE's (A) e (B). Neste caso o VI foi classificado em 4 classes no ArcMap, de acordo com o critério das quebras naturais. De acordo com este cenário, a área de cada classe (figura 94) encontra-se dividida quase homogeneamente. A classe de suscetibilidade nula é a classe com menor representatividade em termos de área, contando com 16% em relação ao total. A classe com maior área em relação ao total da quinta é a classe de suscetibilidade fraca (-6.16- -3.49), com 29%. As áreas consideradas suscetíveis³⁶ contam com uma área de 55% em relação ao total. O cenário 1 do MDE (B) apresenta 46% das áreas classificadas como suscetíveis (figura 95), valor inferior à modelação obtida no MDE (A).

No que concerne aos movimentos de vertentes ocorridos tendo em conta o MDE (A) (figura 96), de acordo com esta classificação 90% das ocorrências encontram-se na classe de suscetibilidade considerada elevada (>-0.442). Na modelação a partir do MDE (B) (figura 97), é de referir que 82% dos deslizamentos ocorridos se localizam na classe considerada de suscetibilidade elevada. Neste caso, há uma diminuição de 8% em relação à modelação obtida no MDE (A).

³⁶ São consideradas as classes moderada e elevada, como as classes suscetíveis.

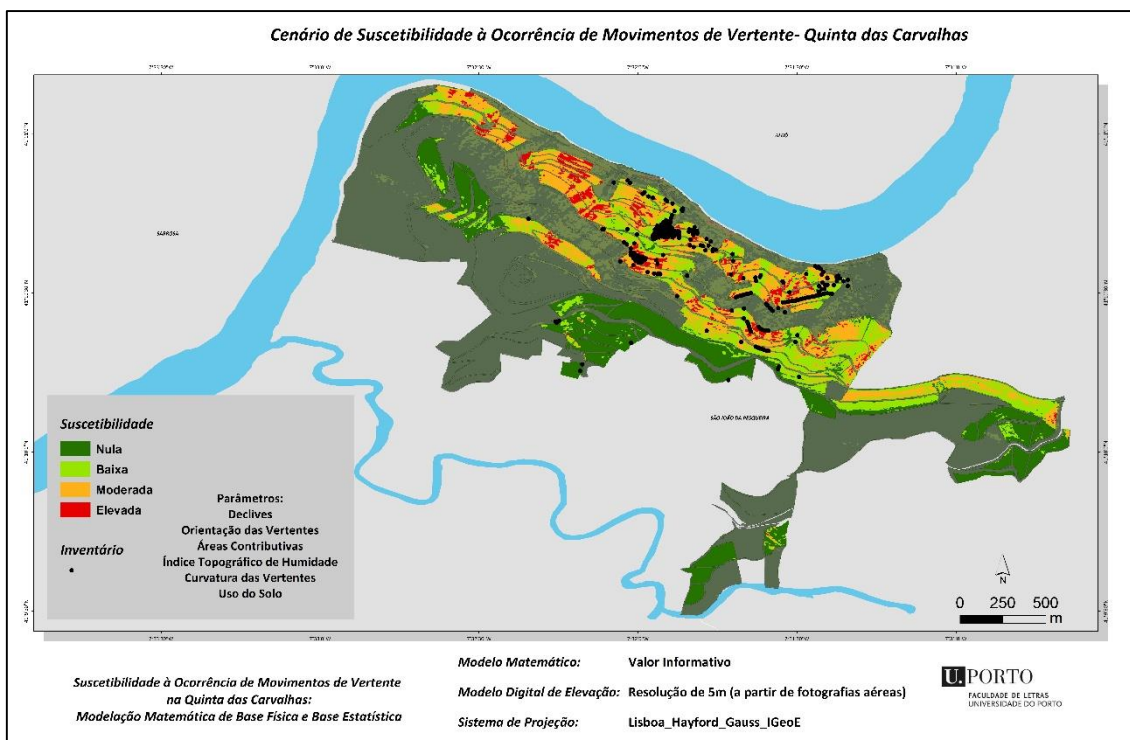


Figura 98- Mapa do cenário 2 de suscetibilidade. Classificação através das quebras no perfil da curva de sucesso - MDE (A).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

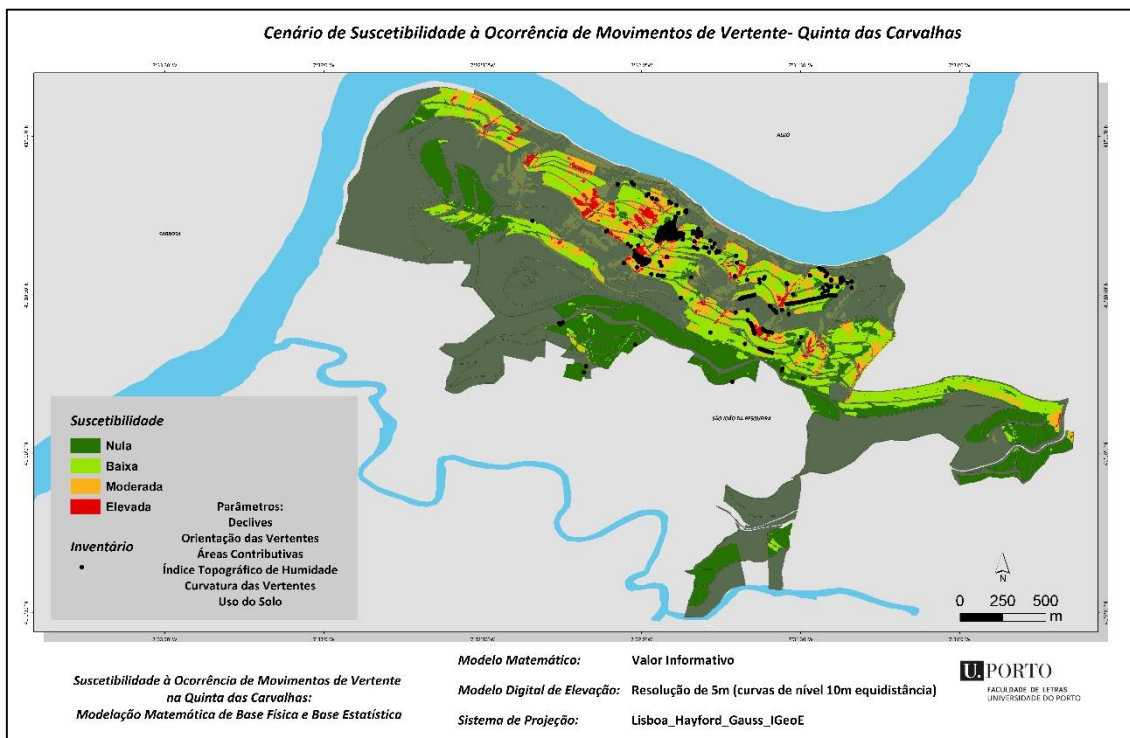


Figura 99- Mapa do cenário 2 de suscetibilidade. Classificação a partir das quebras no perfil da taxa de sucesso- MDE (B).

Fonte: IGEOE, CAOP 2013.

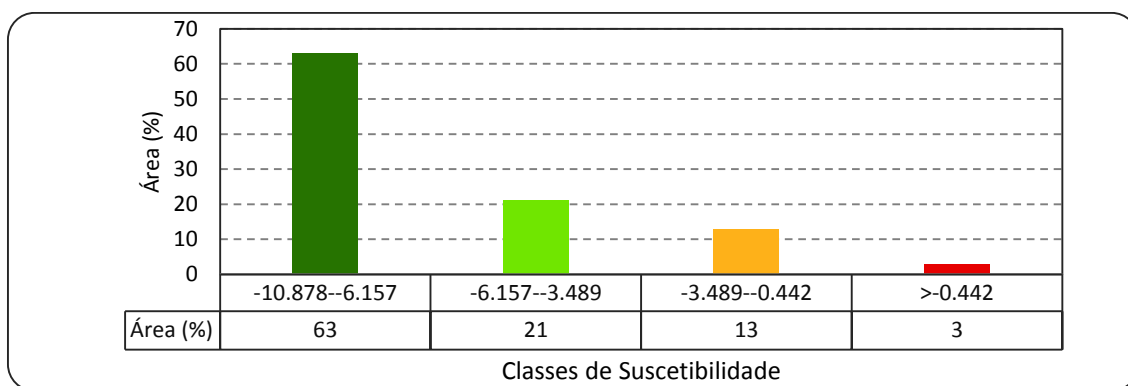


Figura 100- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário 2- MDE (A).

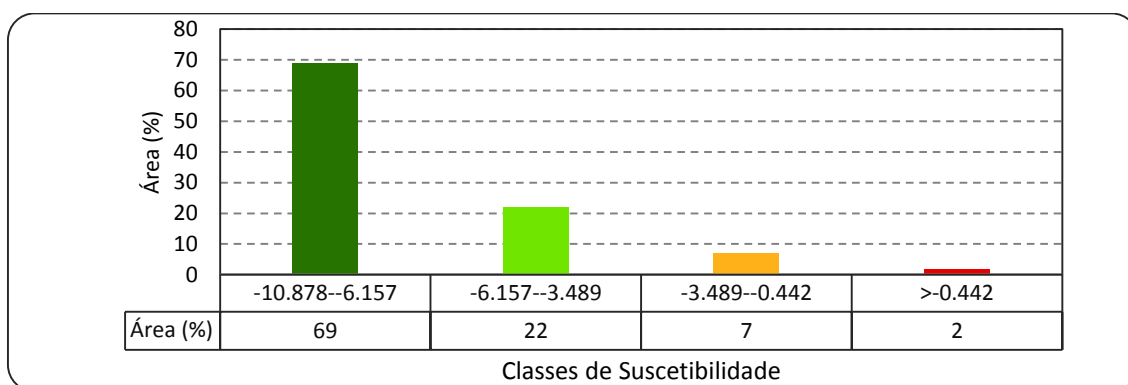


Figura 101- Área (%) por classe de suscetibilidade para o cenário 2- MDE (B).

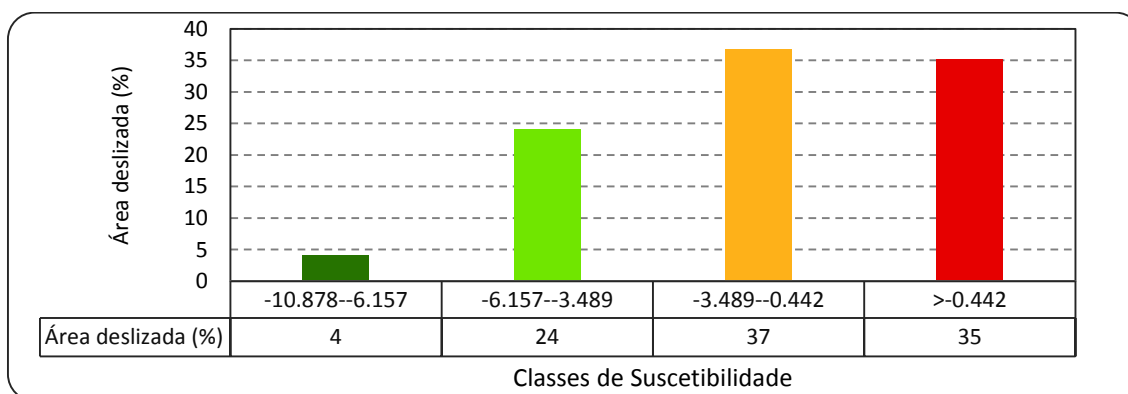


Figura 102- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário 2 – MDE (A).

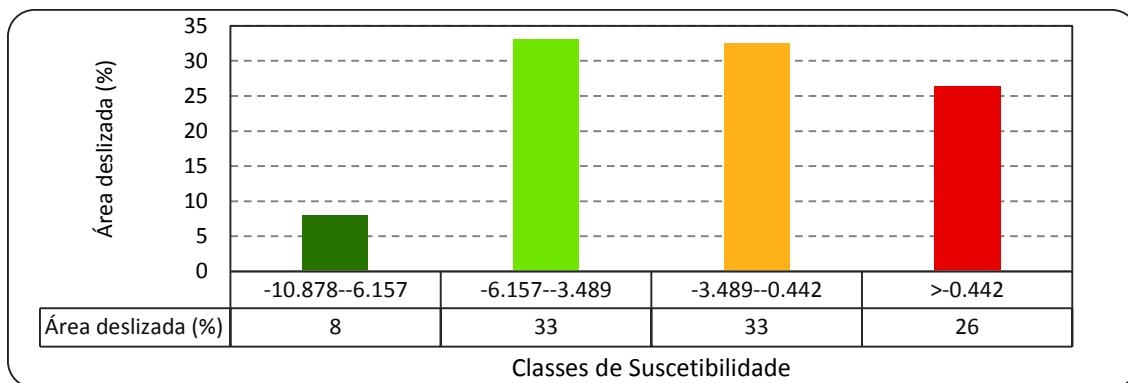


Figura 103- Área deslizada em percentagem por classe de suscetibilidade no cenário 2- MDE (B).

O cenário 2 de suscetibilidade (figura 98 e 99) teve como critério de classificação as ruturas da curva da taxa de sucesso³⁷ obtida. De acordo com o critério de classificação as diferenças entre os cenários 1 e 2 são mais do que evidentes.

Neste caso, na figura 100, 63% do total da área encontra-se classificada como suscetibilidade nula e apenas 3% com suscetibilidade elevada. Por outro lado, na modelação tendo em conta o MDE (B) (figura 101), 69% da área encontra-se na classe de suscetibilidade nula. Um valor superior em relação ao MDE (A). A suscetibilidade elevada conta com 2% comparativamente com os 3 % do MDE (A).

Relativamente aos processos de instabilidade ocorridos na modelação obtida para o MDE (A) (figura 102), é de salientar que de acordo com esta classificação 72% da área deslizada ocorreu nas áreas classificadas como suscetíveis. Já no MDE (B) (figura 103) 59% da área deslizada encontra-se nas áreas classificadas como suscetíveis.

4.2.1 Curva de sucesso

A taxa de sucesso é uma forma de avaliar a capacidade preditiva do modelo em questão (CHUNG and FABBRI, 2008). A curva de sucesso representa o ajuste entre a modelação concretizada e os movimentos de vertentes ocorridos (PEREIRA, 2009). Calculando a taxa de sucesso da modelação pelo Valor Informativo (figura 104) com base no MDE (A), verifica-se que é de 89,9967%. Isto significa que 89.9967 % das ocorrências foram preditas com sucesso. A área abaixo da curva (ACC) representa o valor da taxa de sucesso.

A figura 105 representa a curva de sucesso da modelação realizada a partir do MDE (B). A área abaixo da curva (ACC) é de 0.898048, ou seja, 89.8048 % das ocorrências foram preditas com sucesso.

³⁷ Ver Capítulo 2 (Metodologia de Classificação dos Mapas de Suscetibilidade) e o ponto seguinte (4.2.1).

É possível comparar os dois resultados obtidos, que, apesar de apresentarem valores muito semelhantes denotam a influência dos MDE's utilizados, salientando-se que o MDE (A), com resolução espacial de 5m e realizado a partir das fotografias aéreas de 50cm de resolução, apresenta resultados ligeiramente superiores.

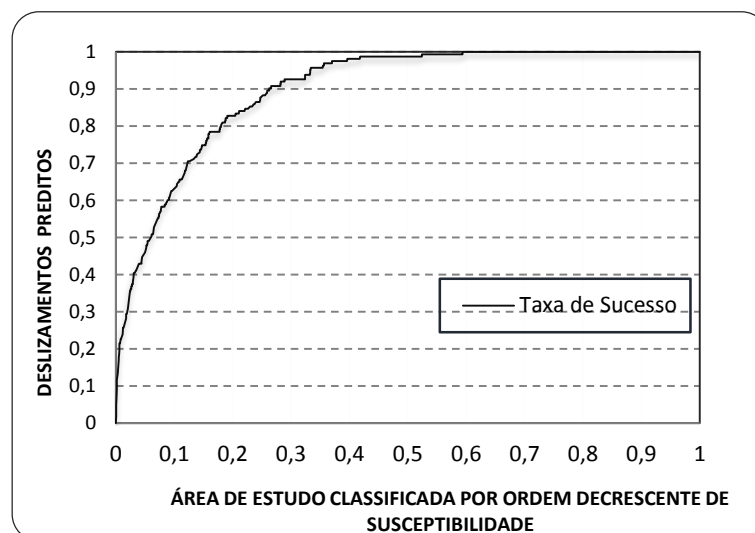


Figura 104- Taxa de sucesso – MDE (A).

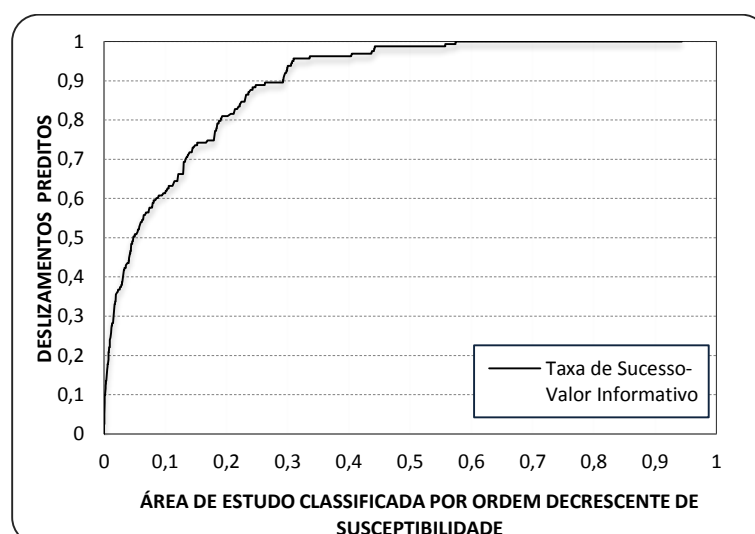


Figura 105- Taxa de sucesso – MDE (B).

4.2.2 Validação dos cenários

O processo de validação pode seguir várias metodologias. No nosso estudo, e como referimos, recorreremos à partição do inventário de forma aleatória em duas amostras, utilizando-se aqui o 'grupo de teste' que representa os restantes 50% dos registos utilizados na modelação.

Tabela 12- Resultado da validação obtida para os cenários 1 e 2 do MDE (A).

Modelação VI		TPR	FPR	ACC	PPV	TPR/FPR
Cenário 1	Classificação por quebras naturais	0,994	0,548	0,452	0,00010	1,813
Cenário 2	Classificação com base na curva de sucesso	0,779	0,159	0,841	0,00026	4,906

O Cenário 1 (tabela 12), ou seja, aquele em que o mapa final do VI seguiu uma classificação de acordo com as quebras naturais, apresenta uma taxa de verdadeiros positivos (TPR) de 99,4%. No cenário 2, a classificação do mapa final do VI realizou-se a partir da curva apresentada pela curva de sucesso. O cenário 2 apresenta uma TPR de 78%, que, de acordo com GUZZETI (2005), corresponde a uma boa validação (in TEIXEIRA [et al.], 2014).

Quanto à taxa dos falsos positivos (FPR), o cenário 1 apresenta uma taxa de 54.8% comparativamente com os 15.9% do cenário 2. A fiabilidade (ACC) é de 45.2% no cenário 1 e 84.1% no cenário 2. Por fim, a precisão (PPV) apresenta valores bastante reduzidos (0.0010%) no cenário 1 e de 0.0026% no cenário 2.

Portanto, apesar de todos os resultados de TPR/FPR serem superiores a 1, o cenário 2 apresenta melhores resultados nos grupos FPR, ACC e PPV, excetuando-se no grupo TPR que não se evidencia o melhor (ainda assim sugere uma boa validação). Este resultado é comprovado pela relação TPR/FPR, com 4.906.

Tabela 13- Resultado da validação para os cenários 1 e 2 do MDE (B).

Modelação VI		TPR	FPR	ACC	PPV	TPR/FPR
Cenário 1	Classificação por quebras naturais	0,988	0,463	0,537	0,00011	2,133
Cenário 2	Classificação com base na curva de sucesso	0,601	0,088	0,912	0,00037	6,856

A tabela 13 representa os resultados obtidos da validação do MDE (B). Neste caso, os cenários permanecem iguais, aquilo que os distingue é o MDE utilizado para a modelação e consequentemente a validação. Portanto no cenário 1, a TPR é de 98.8%, valor esse inferior ao cenário 1 da tabela 13. Quanto ao FPR também se evidencia inferior (46.3%) comparativamente com o cenário 1 do MDE (A) (54.8%).

No que respeita a fiabilidade (ACC), neste caso evidencia-se superior no MDE (B) (53.7%) comparativamente com o mesmo cenário da tabela 12 (45.2%), enquanto a precisão (PPV) é bastante semelhante ao cenário da tabela 13.

Relativamente ao cenário 2, a TPR e FPR mostram-se inferiores com 60.1% e 8%, quando comparadas com o cenário 1. No entanto em relação à ACC e à PPV os valores são superiores ao cenário 1.

Se por outro lado compararmos o cenário 2 da tabela 13, com o mesmo cenário da tabela 12, é de salientar que a FPR, ACC, PPV são inferiores na tabela 12 (MDE A) com exceção da TPR.

Portanto, a validação do cenário 2 da tabela 13, apresenta melhores resultados do que o cenário 2 a partir da modelação do MDE (B), que é comprovada pela relação TPR/FPR.

Em suma, para a modelação obtida através do Valor Informativo, o MDE (B), realizado à escala 1/25000, representando as tendências gerais da superfície topográfica e tendo em conta os fatores condicionantes que a modelação estatística incorpora, permite um melhor apuramento do modelo.

4.3 COMPARAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DE BASE FÍSICA E DO MODELO DE BASE ESTATÍSTICA

Analisando os resultados individualmente, ou seja, os quatro cenários do SHALSTAB e os dois cenários do Valor Informativo, cabe agora realizar uma análise comparativa a fim de avaliar qual o melhor método de análise tendo em conta a validação efetuada. Neste caso foram tidas em conta apenas as melhores validações do SHALSTAB e do VI.

Tabela 14- Validação do Valor Informativo e do SHALSTAB para o MDE (A).

Modelação VI		TPR	FPR	ACC	PPV	TPR/FPR
Cenário 2	Classificação com base na curva de sucesso	0,779	0,159	0,841	0,00026	4,906
Modelo SHALSTAB		TPR	FPR	ACC	PPV	TPR/FPR
Cenário D	$c' - 2700 \text{ N/m}^2$; $Z - 1\text{m}$; $p_s - 16,7 \text{ kN/m}^3$; $\phi - 40^\circ$	0,610	0,303	0,697	0,00022	2,016

A tabela 14 apresenta o melhor cenário obtido para o VI e SHALSTAB para o MDE (A). O cenário 2 do VI, apresenta os melhores resultados em todos os grupos de validação, nomeadamente, TPR de 80%, FPR de 16%, ACC de 84% e PPV de 0.0026%. A relação TPR/FPR apresenta um valor de 4.906.

No SHALSTAB, é o cenário D que apresenta melhores validações, mas quando comparado com os valores obtidos pelo VI, mostram-se inferiores. Com TPR de 61%, FPR de 30%, ACC de 70%, PPV de 0.00022% e a relação TPR/FPR de 2.016.

Tabela 15- Validação do valor informativo e do SHALSTAB para o MDE (B).

Modelação VI		TPR	FPR	ACC	PPV	TPR/FPR
Cenário 2	Classificação com base na curva de sucesso	0,601	0,088	0,912	0,00037	6,856
Modelo SHALSTAB		TPR	FPR	ACC	PPV	TPR/FPR
Cenário D	$c' - 2700 \text{ N/m}^2$; $Z - 1\text{m}$; $p_s - 16,7 \text{ kN/m}^3$; $\phi - 40^\circ$	0,592	0,337	0,663	0,00019	1,757

A tabela 15 apresenta o melhor cenário obtido para o VI e para o SHALSTAB tendo em conta o MDE (B), verificando-se que os melhores cenários do MDE (A) se repetem no MDE (B).

O cenário 2 prevalece em relação ao cenário D do SHALSTAB. Apresenta valores de 60% na TPR, FPR de 8.8%, ACC de 91.2% e PPV de 0.037%. Contudo, a TPR apresenta um valor de 60.1%, valor abaixo do considerado aceitável para uma boa predição (FAWCETT, 2006). A relação TPR/FPR apresenta um valor de 6.856. O SHALSTAB apresenta piores resultados em todos os grupos de validação.

O modelo estatístico apresenta melhores validações pelo facto dos fatores condicionantes selecionados para modelação e tendo em conta o inventário realizado, permitirem um melhor ajustamento do modelo à realidade estudada.

CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho centra-se na avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente na Quinta das Carvalhas. Para isso, recorreu-se à aplicação de um modelo matemático de base física (SHLASTAB) e de base estatística (Valor Informativo- VI), no sentido de verificar qual o modelo que melhor se ajusta à área em estudo.

A aplicação do SHALSTAB, possui a vantagem de não incorporar o inventário de ocorrências na modelação. Ou seja, a modelação é feita tendo apenas em conta os parâmetros físicos, hidrológicos e topográficos, derivados do MDE ou de trabalho de campo. Por exemplo, os parâmetros físicos como o ângulo de atrito, o peso específico do solo, a coesão e a espessura do foram obtidos através de levantamentos no terreno e por retroanálise. Considerando valores distintos para estes parâmetros, é possível traçar diferentes cenários de suscetibilidade.

Quanto ao VI, este possui a vantagem de ser o investigador a escolher os fatores condicionantes que melhor descrevem a instabilidade ocorrida. Neste caso, o inventário realizado foi utilizado para a modelação. No entanto, para efeitos de validação, o inventário foi dividido aleatoriamente em duas partes iguais, aplicando-se cada metade 50% na modelação e na validação. Salienta-se, ainda, que neste modelo preditivo os diferentes cenários de suscetibilidade foram definidos considerando dois métodos de classificação do mapa final.

O levantamento de parâmetros hidrológicos (condutividade hidráulica e capacidade de infiltração), de resistividade elétrica e texturas do solo evidenciaram-se uma mais-valia na tentativa de compreender o funcionamento hidrológico das vertentes e a relação com a instabilidade geomorfológica ocorrida. De salientar que a área de estudo, sendo uma Quinta na Região Demarcada do Douro e com alterações significativas de cariz antrópico na topografia, a relação dos parâmetros levantados permitem caracterizar o espaço físico e os modelos de escoamento existentes.

A suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente de acordo com o SHALSTAB e considerando vários cenários, permite concluir que o aumento de z (espessura do solo) implica um aumento das áreas consideradas instáveis, mas, em termos de validação, apenas obtém bons resultados na TPR (taxa de verdadeiros positivos). Por outro lado, valores mais elevados de c' (coesão do solo), diminuem as áreas consideradas instáveis.

O SHALSTAB apresentou melhores resultados no cenário D, com valores de $\phi=40^\circ$, $p_s=16.7 \text{ kN/m}^3$, $c'=2700 \text{ N/m}^2$ e $z=1\text{m}$. É o cenário que apresenta o valor de z mais baixo, diminuindo as áreas consideradas instáveis. O valor de c' é também elevado, o que também diminui as áreas consideradas instáveis. Para a modelação do SHALSTAB a partir do MDE (B), é novamente o cenário D a apresentar melhores validações.

No entanto, é no cenário D do MDE (A), realizado a partir das fotografias aéreas com 50cm de resolução espacial, que os resultados da validação se mostram melhores. Tal resultado é verificado pelo facto dos algoritmos matemáticos incorporados na modelação e o detalhe do MDE (A), permitirem um melhor ajustamento à realidade.

No caso do VI, o cenário 2 - ou seja, aquele cuja classificação do mapa final se baseou na curva da taxa de sucesso - apresentou os melhores resultados para os dois MDE's, embora o MDE (B) (MDE realizado a partir de curvas de nível de 10 m de equidistância, pontos cotados e hidrografia à escala 1/25000) se revele um pouco superior pelo facto dos fatores condicionantes utilizados para a modelação permitirem representar melhor o tipo de escoamento verificado nas vertentes. Por fim, comparando o melhor cenário obtido no SHALSTAB e no VI é possível concluir que o cenário 2 do VI é o que mais se destaca. Apresenta melhores validações em todos os grupos de validação, quer para a modelação obtida pelo MDE (A) quer pelo MDE (B), destacando-se este último.

O VI apresenta os melhores resultados em termos gerais pelo facto dos fatores condicionantes utilizados para a modelação (declives, orientação das vertentes, áreas contributivas, índice topográfico de humidade, uso do solo e curvatura) evidenciarem um bom ajuste do modelo tendo em conta o inventário realizado.

Para trabalho futuro, torna-se importante proceder a uma reavaliação do inventário realizado, pois alguns problemas encontrados ao longo da modelação estatística poderão ser superados se for possível contabilizar processos de instabilidade cujos indícios tendem a ser rapidamente 'apagados' pelos trabalhos de recuperação dos taludes. Por ser uma área com forte intervenção antrópica torna-se essencial a correção dos sistemas de drenagem existentes na Quinta das Carvalhas, para melhor entendimento do funcionamento hidrológico desta área, e de forma a obter resultados ainda mais fiáveis na avaliação da suscetibilidade pelo Valor Informativo e pelo SHALSTAB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aleotti, P.; Chowdhury, R. - Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. 58. n.º 1 (1999). pp. 21-44. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1007/s100640050066>>. 1435-9529
- America, Soil Science Society of - Glossary of Soil Science Terms. Disponível em WWW: <<https://www.soils.org/publications/soils-glossary>>.
- Aquino, F. R. - Estudo Comparativo entre Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas de um solo Argiloso Compactado. Brasília: Universidade de Brasília Departamento de Engenharia Civil e Ambiental 2010. Mestre
- Arnold, Richard W. - Concepts of soils. Em (CERTINI, G. & SCALENGHE, R.) Soils: Basic Concepts and Future Challenges. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=6On8ugAACAAJ>>.Cap. 9781107406438
- Bateira, C. - Movimentos de Vertente do NW de Portugal, Susceptibilidade Geomorfológica e Sistemas de Informação Geográfica Porto: Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Departamento de Geografia 2001. Doutor
- Bateira, C. - Textos não publicados (2013).
- Baum, R. L.; Savage, W. Z. ; Godt, J. W. - TRIGRS: A FORTRAN Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis 2002.
- Baum, Rex L.; Savage, William Z. ; Godt, Jonathan W. - TRIGRS—A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0. Virginia: 2008.
- Besson, A.; Cousin, I.; Samouelian, A.; Boizard, H.; Richard, G. - Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. *Soil & Tillage Research*. Vol. 79. n.º 2 (2004). pp. 239-249. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000225822000012>. 0167-1987
- Beven, K. J.; Kirkby, M. J. - A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*. Vol. 24. (1979). pp. 43-69.
- Borga, M.; Dalla Fontana, G.; Da Ros, D.; Marchi, L. - Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data. *Environmental Geology*. Vol. 35. n.º 2-3 (1998). pp. 81-88. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000075902900002>. 0943-0105
- Borga, M.; Dalla Fontana, G.; Gregoret, C.; Marchi, L. - Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability. *Hydrological Processes*. Vol. 16. n.º 14 (2002). pp. 2833-2851. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000178762500008>. 0885-6087
- Cardinali, M.; Reichenbach, P.; Guzzetti, F.; Ardizzone, F.; Antonini, G.; Galli, M.; Cacciano, M.; Castellani, M.; Salvati, P. - A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol. 2. n.º 1-2 (2002). pp. 57-72. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000208897200007>. 1561-8633
- Carrara, Alberto; Crosta, Giovanni; Frattini, Paolo - Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology*. Vol. 94. n.º 3-4 (2008). pp. 353-378. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X07002735>>. 0169-555X
- Chung, Chang-Jo; Fabbri, Andrea G. - Predicting landslides for risk analysis — Spatial models tested by a cross-validation technique. *Geomorphology*. Vol. 94. n.º 3-4 (2008). pp. 438-452. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X07002772>>. 0169-555X

- Chung, Chang-JoF; Fabbri, AndreaG - Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Natural Hazards*. Vol. 30. n.º 3 (2003). pp. 451-472. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1023/B%3ANHAZ.0000007172.62651.2b>>. 0921-030X
- Crozier, M.J. - Landslides: Causes, Consequences & Environment. Croom Helm, 1986. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=wkRRAAAAMAAJ>>. 9780709907909
- Cruden, D. M. ; Varnes, D. J. - Landslide Types and Processes. Em (TURNER, A. K. & SCHUSTER, R. L.) Landslides: Investigation and Mitigation. National Academy Press, 1996a. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=3eg8Y0IA6UkC>>.Cap. 3i. 9780309062084
- Cruden, D. M. ; Varnes, D. J. - Landslide Types and Processes. Em (TURNER, A. K. & SCHUSTER, R. L.) Landslides: Investigation and Mitigation. National Academy Press, 1996b. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=3eg8Y0IA6UkC>>.Cap. 3i. 9780309062084
- Cruden, D. M. ; Varnes, D. J. - Landslide Types and Processes. Em (TURNER, A. K. & SCHUSTER, R. L.) Landslides: Investigation and Mitigation. National Academy Press, 1996c. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=3eg8Y0IA6UkC>>.Cap. 3i. 9780309062084
- Cruden, D. M. ; Varnes, D. J. - Landslide Types and Processes. Em (TURNER, A. K. & SCHUSTER, R. L.) Landslides: Investigation and Mitigation. National Academy Press, 1996d. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=3eg8Y0IA6UkC>>.Cap. 3i. 9780309062084
- Daveau, S. - Comentários e actualizações. Em (RIBEIRO, O., LAUTENSACH, H. & DAVEAU, S.) Geografia de Portugal: o ritmo climático e a paisagem. João Sá da Costa, 1988.
- Dias, J. Alveirinho - A Análise Sedimentar e o Conhecimento dos Sistemas Marinhos (2004).
- Dietrich, W. E; Asua, R. R. D.; Orr, J. C. B.; Trso, M. - A validation study of the shallow slope stability model, SHALSTAB, in the forest lands of Northern California. Berkeley: 1998.
- Dietrich, W. E.; Wilson, C. J. ; Montgomery, D. R.; Mckean, J. - Analysis of erosion thresholds, channel networks and landscape morphology using a digital terrain model. *Journal of Geology*. Vol. 3. (1993). pp. 161-180.
- Dietrich, William E.; Reiss, Robert; Hsu, Mei-Ling; Montgomery, David R. - A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes*. Vol. 9. n.º 3-4 (1995). pp. 383-400. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.3360090311>>. 1099-1085
- Dikau, R.; Brunsden, D.; Schrott, L.; Ibsen, M.-L. - Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. Chichester: 1996a.
- Distribución, Área Ingeniería - Medida de Resistividad Eléctrica del Suelo (2008).
- Elrick, D. E.; Reynolds, W. D.; Tan, K. A. - HYDRAULIC CONDUCTIVITY MEASUREMENTS IN THE UNSATURATED ZONE USING IMPROVED WELL ANALYSES. *Ground Water Monitoring and Remediation*. Vol. 9. n.º 3 (1989). pp. 184-193. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:A1989AG08800012>. 1069-3629
- Fawcett, T. - An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. Vol. 27. n.º 8 (2006). pp. 861-874. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000237462800002>. 0167-8655
- Fernandes, J.; Soares, L.; Bateira, C.; Faria, A.; Oliveira, A. S.; Teixeira, M.; Hermenegildo, C. - MODRIS: Suscetibilidade a processos hidrogeomorfológicos no Norte de Portugal: modelação matemática de base física e de base estatística. Porto: Letras Departamento de Geografia Física 2014.
- Fernandes, Mariana Alher - Condutividade Hidráulica Não Saturada de um Solo Aneroso: Aplicação do Infiltrômetro de Disco. São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2011. Mestre
- Fernandes, N. F.; Guimaraes, R. F.; Gomes, R. A. T.; Vieira, B. C.; Montgomery, D. R.; Greenberg, H. - Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling.

- Catena. Vol. 55. n.º 2 (2004). pp. 163-181. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000188861600005>. 0341-8162
- Ferreira, A. B.; Ferreira, D. B.; Daveau, S.; Feio, M.; Martins, A.; Pereira, A. R.; Ribeiro, A. - O Relevo de Portugal Grandes Unidades Regionais. Coimbra: 2004.
- Ferreira, A. de Brum - Neotectonics in Northern Portugal. A geomorphological approach. Z. *Geomorph.* Vol. Bd 82. (1991). pp. 33-85.
- Ferreira, N.; Iglesias, M.; Noronha, F.; Pereira, E.; Ribeiro, A.; Ribeiro, M.L. - Granitóides da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. Madrid: 1987.
- Foth, Henry D. - Fundamentals of Soil Science. Eighth Eddition. Michigan State University, 1990.
- Garcia, R. A. C. - Metodologias de Avaliação da Perigosidade e Risco associado a Movimentos de Vertente. Aplicação na bacia do rio Alenquer Lisboa: Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território 2012. Doutor
- Garcia, R.; Zêzere, J. L. - Avaliação de Riscos Geomorfológicos: Conceitos, Terminologia e Métodos de Análise Em III Seminário Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território, Vila Real 2003.
- Garcia, R.; Zêzere, J. L.; Cruz de Oliveira, S. - A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de susceptibilidade a movimentos de vertente. Em Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos Lisboa, 2007.
- Geotechdata - Soil Cohesion. 2011a. Disponível em WWW: <<http://www.geotechdata.info/parameter/cohesion.html>>.
- Geotechdata - Soil friction angle. 2011b. Disponível em WWW: <<http://www.geotechdata.info/parameter/angle-of-friction.html>>.
- Giroto, E. M.; Santos, I. A. - Medidas de Resistividade Elétrica DC em Sólidos: como efetuá-las corretamente 2002.
- Glade, T.; Anderson, M.G.; Crozier, M.J. - Landslide Hazard and Risk. Wiley, 2005. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=7vXQvl6rR54C>>. 9780471486633
- Gomes, Maria Carolina Villaça - Análise da influência da condutividade hidráulica saturada dos solos nos escorregamentos rasos na bacia do rio Guanxiduba (SP). São Paulo, Brasil: Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia, 2012. Mestre
- Gomes, R. - Modelagem de Previsão de Movimentos de Massa a Partir da Combinação de Modelos de Escorregamentos e Corridas de Massa. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia 2006. Doutor
- Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M.; Reichenbach, P. - Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*. Vol. 31. n.º 1-4 (1999a). p. 186. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000086086500009>. 0169-555X
- Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M.; Reichenbach, P. - Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*. Vol. 31. n.º 1-4 (1999b). pp. 181-216. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000086086500009>. 0169-555X
- Highland, L.; Bobrowsky, P. - The landslide handbook—A guide to understanding landslides. Reston, Virginia: 2008.
- Instituto dos Vinhos do Douro e do Porto, I.P - Manual de Boas Práticas Vitícolas na Região Demarcada do Douro 2012a.
- Instituto dos Vinhos do Douro e do Porto, I.P - Manual de Boas Práticas Vitícolas na Região Demarcada do Douro (versão integral) 2012b.
- Iverson, Richard M. - Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*. Vol. 36. n.º 7 (2000). pp. 1897-1910. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1029/2000WR900090>>. 1944-7973
- Julião, R.; Nery, F.; Ribeiro, J.; Castelo Branco, M.; Zêzere, J. L. - Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação

- geográfica (sig) de base municipal. Instituto Geográfico Português 2009. 978-989-96121-4-3
- Kim, D; Im, S; Ho Lee, S; Hong, Y; Chang, K - Predicting the Rainfall-Triggered Landslides in a Forested Mountain Region Using TRIGRS Model. *Science Press and Institute of Mountain Hazards and Environment*. (2010).
- Liao, Zonghu; Hong, Yang; Kirschbaum, Dalia; Adler, RobertF; Gourley, JonathanJ; Wooten, Rick - Evaluation of TRIGRS (transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis)'s predictive skill for hurricane-triggered landslides: a case study in Macon County, North Carolina. *Natural Hazards*. Vol. 58. n.º 1 (2011). pp. 325-339. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11069-010-9670-y>>. 0921-030X
- Malamud, B. D.; Turcotte, D. L.; Guzzetti, F.; Reichenbach, P. - Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 29. n.º 6 (2004). pp. 687-711. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000222253600003>. 0197-9337
- Marques, Jorge Manuel Espinha - Contribuição para o Conhecimento da Hidrogeologia da Região do Parque Natural da Serra da Estrela (Sector de Manteigas- Nave de Santo António - Torre). Porto: Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, 2007. Doutor
- Meisina, C.; Scarabelli, S. - A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. *Geomorphology*. Vol. 87. n.º 3 (2007). pp. 207-223. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000251891800008>. 0169-555X
- Mesquita, Maria da Glória Bastos de Freitas; Moraes, Sergio Oliveira - A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciencia Rural*. Vol. 34, nº3. (2004). pp. 963-969.
- Miranda Neto, M. I. de - Investigação Geoambiental em Área de Mangue na Baía de Guanabara Contaminada com Resíduos Industriais Rio de Janeiro Universidade Federal do Rio de Janeiro Ciências em Engenharia Civil 2002. Mestre
- Montgomery, David R.; Dietrich, William E. - Source areas, drainage density, and channel initiation. *Water Resources Research*. Vol. 25. n.º 8 (1989). pp. 1907-1918. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1029/WR025i008p01907>>. 1944-7973
- Montgomery, David R.; Dietrich, William E. - A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*. Vol. 30. n.º 4 (1994). pp. 1153-1171. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1029/93WR02979>>. 1944-7973
- Montgomery, David R.; Sullivan, Kathleen; Greenberg, Harvey M. - Regional test of a model for shallow landsliding. *Hydrological Processes*. Vol. 12. n.º 6 (1998). pp. 943-955. Disponível em WWW: <[http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199805\)12:6<943::AID-HYP664>3.0.CO;2-Z](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199805)12:6<943::AID-HYP664>3.0.CO;2-Z)>. 1099-1085
- Moreira, N.; Búrcio, M.; Dias, R.; Coke, C. - Partição da deformação Varisca nos sectores de Peso da Régua e Vila Nova de Foz Côa (Autóctone da Zona Centro Ibérica). *Comunicações Geológicas*. Vol. tT.97 (2010). pp. 147-162.
- O'Loughlin, E. M. - Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. *Water Resources Research*. Vol. 22. n.º 5 (1986). pp. 794-804. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1029/WR022i005p00794>>. 1944-7973
- Oliveira, A. S.; Bateira, C.; Soares, L.; Faria, A.; Fernandes, J.; Teixeira, M.; Hermenegildo, C. - MODRIS: Suscetibilidade a processos hidrogeomorfológicos no Norte de Portugal: modelação matemática de base física e de base estatística. Porto: Letras Departamento de Geografia Física 2014.
- Pacheco, A. O. - Ensaio com Cone Resistivo em Solos Saturados Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro Engenharia Civil 2004. Mestre
- PACK, R. T.; D. G. Tarboton; Goodwin., C. N. - Terrain Stability mapping with SINMAP. Technical description and users guide for version 1.00. 1998. Disponível em WWW: <<http://hydrology.uwrl.usu.edu/sinmap2/>>.

- Pedrosa, A.; Martins, M.; Pedrosa, F. - Processos de erosão acelerada. Região Demarcada do Douro: um património em risco. *Douro*. Vol. 17. (2004). pp. 213-238.
- Pereira, E. - Breve História Geológica do NE de Trás-os-Montes (Paisagem Protegida da Albufeira do Azibo e Maciço de Morais). Disponível em WWW: <<http://www.azibo.org/geohistorappaa.pdf>>.
- Pereira, S. - Perigosidade a Movimentos de Vertente na Região Norte de Portugal Porto: Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Departamento de Geografia 2009. Doutor
- Pereira, S.; Zezere, J. L.; Quaresma, I. D.; Bateira, C. - Landslide incidence in the North of Portugal: Analysis of a historical landslide database based on press releases and technical reports. *Geomorphology*. Vol. 214. (2014). pp. 514-525. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000336345700038>. 0169-555X
- QEnergia - Redes de Terras - Resistividade do solo. Disponível em WWW: <<http://www.qenergia.pt/content/index.php?action=detailfo&rec=148>>.
- Quinn, P.; Beven, K.; Chevallier, P.; Planchon, O. - THE PREDICTION OF HILLSLOPE FLOW PATHS FOR DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODELING USING DIGITAL TERRAIN MODELS. *Hydrological Processes*. Vol. 5. n.º 1 (1991). pp. 59-79. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:A1991EW93700005>. 0885-6087
- Remondo, Juan; González, Alberto; De Terán, JoséRamónDíaz; Cendrero, Antonio; Fabbri, Andrea; Chung, Chang-JoF - Validation of Landslide Susceptibility Maps; Examples and Applications from a Case Study in Northern Spain. *Natural Hazards*. Vol. 30. n.º 3 (2003). pp. 437-449. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1023/B%3ANHAZ.0000007201.80743.fc>>. 0921-030X
- Roger-Estrade, J.; Richard, G.; Caneill, J.; Boizard, H.; Coquet, Y.; Defossez, P.; Manichon, H. - Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil & Tillage Research*. Vol. 79. n.º 1 (2004). pp. 33-49. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000223509200003>. 0167-1987
- Samouëlian, A.; Cousin, I.; Tabbagh, A.; Bruand, A.; Richard, G. - Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research*. Vol. 83. n.º 2 (2005). pp. 173-193. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198704002326>>. 0167-1987
- Schaetzl, R.J.; Anderson, S. - Soils: Genesis and Geomorphology. Cambridge University Press, 2005. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=xASdKCoT6McC>>. 9780521812016
- Seixas, A.; Bateira, C.; Hermenegildo, C.; Soares, L. ; Pereira, S. - Definição de critérios de susceptibilidade geomorfológica a movimentos de vertente na Bacia Hidrográfica da Ribeira da Meia Léguas 2006.
- Selby, M. J. - Hillslope: Materials and Processes. Oxford, England: 1993a.
- Selby, M.J. - Hillslope Materials and Processes. Oxford University Press, Incorporated, 1993b. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=Qj27QgAACAAJ>>. 9780198741831
- Sequeira, A. J. D.; Pereira, E. - Grupo do Douro, Breve Excursão de Terreno na Região de Pinhão-Sabrosa. Em (GEÓLOGOS, A. P. D.) GeoNovas Porto: 2000.
- Silvério, M. - Erosão hídrica dos solos na Serra da Aboboreira. Porto: Faculdade de Letras Departamento de Geografia, 2000. Mestre
- Soares, L. - A Importância das Formações Superficiais no Âmbito dos Processos de Erosão Hídrica e Movimentos de Vertente no NW de Portugal Porto: Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Departamento de Geografia 2008. Doutor
- Soeters, Robert; Van Westen, C. J. - Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation Em (TURNER, A. K. & SCHUSTER, R. L.) Landslides: Investigation and Mitigation. National

- Academy Press, 1996. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=3eg8Y0IA6UkC>>.Cap. 3i. 9780309062084
- SoilMoisture - Operating Instructions- Model 2800K1 Guelph Permeameter Santa Barbara, EUA: 2008.
- Sousa, M. Bernardo de - Carta Geológica de Portugal: Notícia Explicativa da Folha 10- D, Alijó. Lisboa: 1989.
- Sultan, N.; Cochonat, P.; Canals, M.; Cattaneo, A.; Dennielou, B.; Haflidason, H.; Laberg, J. S.; Long, D.; Mienert, J.; Trincardi, F.; Urgeles, R.; Vorren, T. O.; Wilson, C. - Triggering mechanisms of slope instability processes and sediment failures on continental margins: a geotechnical approach. *Marine Geology*. Vol. 213. n.º 1-4 (2004). pp. 291-321. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000226172800012>. 0025-3227
- Tarboton, D. G. - A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*. Vol. 33. n.º 2 (1997). pp. 309-319. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:A1997WF23900003>. 0043-1397
- Teixeira, M. - Avaliação da Suscetibilidade à Ocorrência de Deslizamentos Translacionais Superficiais. Utilização de Modelos Matemáticos de Base Física na Bacia de Tibo, Arcos de Valdevez Porto: Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Departamento de Geografia 2012. Mestre
- Teixeira, Manuel; Bateira, Carlos; Marques, Fernando; Vieira, Bianca - Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal. *Landslides*. (2014). pp. 1-14. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10346-014-0494-9>>. 1612-510X
- Van Beek, L. P. H.; Van Asch, T. W. J. - Regional assessment of the effects of land-use change on landslide hazard by means of physically based modelling. *Natural Hazards*. Vol. 31. n.º 1 (2004). pp. 289-304. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000220303700016>. 0921-030X
- van Westen, Cees J.; Soeters, Rob; Sijmons, Koert - Digital geomorphological landslide hazard mapping of the Alpago area, Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 2. n.º 1 (2000). pp. 51-60. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243400850266>>. 0303-2434
- Varnes, D. J - Landslide Types and Processes. Em (ECKEL, E. B.) Landslides and Engineering Practice. Academ. Sci.,: Highway Research Bord, Special Report, 1958.
- Varnes, D. J - Slope movement types and processes 1978.
- Varnes, D. J. - Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice *International Association of Engineering Geology Commission of Landslides*. (1984a).
- Varnes, D.J. - Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Unesco, 1984b. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=vT9RAAAAMAJ>>. 9789231018954
- Verde, J. - Avaliação da Perigosidade de Incêndio Florestal Lisboa: Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Geografia, 2008. Mestre
- Vieira, B. - Previsão de Escorregamentos Translacionais Rasos Na Serra do Mar (SP) a partir de Modelos Matemáticos em Bases Físicas. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro Departamento de Geografia 2007. Doutor
- Weemees, I. . - Development of an Electrical Resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies University of British Columbia Department of Civil Engineering, 1990. Master
- Westen, C. J. van; Asch, T. W. J.; Soeters, R. - Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. 65. n.º 2 (2006). pp. 167-184. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>>. 1435-9529
- Westen, C. J. van; Rengers, N.; Soeters, R. - Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. *Natural Hazards*. Vol. 30. n.º 3 (2003). pp. 399-419.

- Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1023/B%3ANHAZ.0000007097.42735.9e>>. 0921-030X
- Wieczorek, Gerald - *Landslide Triggering Mechanisms*. Em (TURNER, A. K. & SCHUSTER, R. L.) *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Academy Press, 1996. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=3eg8YOlA6UkC>>.Cap. 3i. 9780309062084
- WP/WLI - *A suggested Method for Reporting a Landslide* 41. 1990.
- WP/WLI - *A Suggested Method for a Landslide Summary*. 1991.
- WP/WLI - *A Suggested Method for a Landslide Summary*. 1993a.
- WP/WLI - *Multilingual Landslide Glossary*. Richmond, British Columbia, Canada: BiTech Publishers, 1993b.
- WRB - *World reference base for soil resources: A framework for international classification, correlation and communication* 2006.
- Wu, Weimin; Sidle, Roy C. - *A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Basins*. *Water Resources Research*. Vol. 31. n.º 8 (1995). pp. 2097-2110. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1029/95WR01136>>. 1944-7973
- Yin, K. L.; Yan, T. Z. - *STATISTICAL PREDICTION MODELS FOR SLOPE INSTABILITY OF METAMORPHOSED ROCKS*. Rotterdam: A a Balkema, 1988. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:A1988BQ62Z00210>. 90-6191-837-5
- Zêzere, J. L. - *Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa* Lisboa: Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa 1997a.
- Zêzere, J. L. - *Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa* Lisboa: Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa 1997b. Doutor
- Zêzere, J. L. - *Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa* Lisboa: Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa 1997c.
- Zêzere, J. L.; Tavares, A. O; Bateira, Carlos Valdir de Meneses; Lopes, A. M. S; Mendes, José Manuel; Santos, P; Hermenegildo, Carlos Manuel; Soares, Laura Maria P.M.; Martins, Luciano F. Ribeiro; Trigo, Ricardo M.; Gouveia, C. M. P; Varino, F. C. M; Henriques, E. P; Reis, E. J. M; Rocha, F. J; Fonseca, I. L; Quaresma, I. D. O; Fragoso, M. H; Vale, M, Q; Ramos, M, C, M; Garcia, Ricardo A. C.; Oliveira, S. M, C; Pereira, Susana da Silva; Vaz, Teresa; Santos, Mónica S. M - *Desastres naturais de origem hidro-geomorfológica em Portugal: base de dados SIG para apoio à decisão no ordenamento do território e planeamento de emergência*. 2010a. Disponível em WWW: <<http://riskam.ul.pt/disaster/>>.
- Zêzere, J.L.; Quaresma, I.; ; Tavares, A.; ; Bateira, C.; Trigo, R.; DISASTER, Equipa do Projecto - *DISASTER - Desastres Naturais de origem Hidro-Geomorfológica em Portugal: Base de Dados SIG para apoio à decisão no ordenamento do território e planeamento de emergência*. Em Proceedings de V Congresso Nacional de Geomorfologia, Porto, 2010b.